



Уральский
федеральный
университет

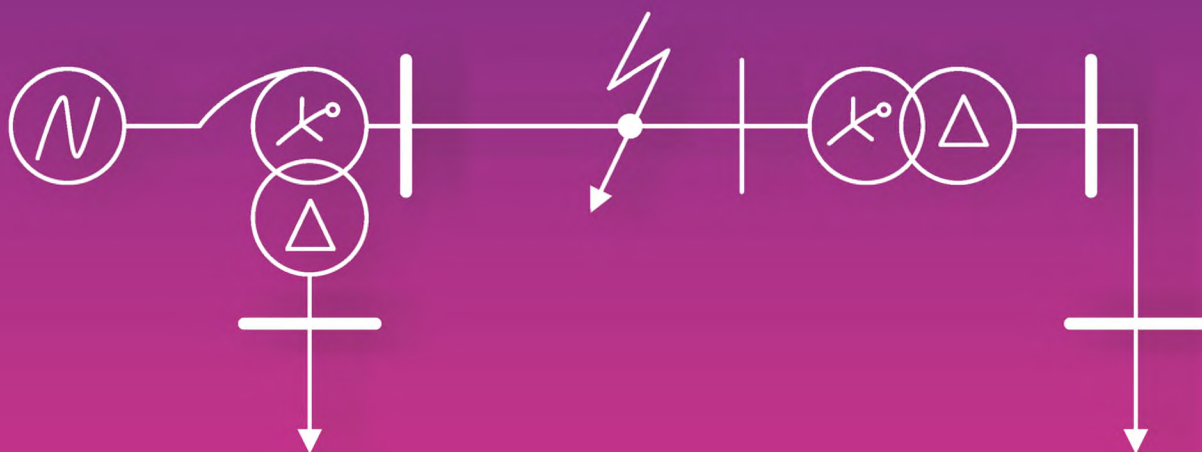
имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Уральский
энергетический
институт

Е. Н. КОТОВА
Т. Ю. ПАНИКОВСКАЯ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Учебно-методическое пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Е. Н. Котова, Т. Ю. Паниковская

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

*Рекомендовано методическим советом УрФУ
в качестве учебно-методического пособия для студентов,
обучающихся по направлениям подготовки
140400 – Электроэнергетика и электротехника,
140200 – Электроэнергетика*

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2014

УДК 621.3.018.782.3(075.8)
ББК 31.21я73+31.27я73
К73

Рецензенты:

кафедра «Автоматизированные системы электроснабжения» Российского государственного профессионально-педагогического университета завкафедрой доц., канд. техн. наук С. В. Федорова (протокол № 3 от 25.10.12 г.);

доц., канд. техн. наук В. А. Смирнов (ОАО «Инженерный центр энергетики Урала»)

Научный редактор – доц., канд. техн. наук О. М. Котов

Котова, Е. Н.

К73 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ : учебно-метод. пособие / Е. Н. Котова, Т. Ю. Паниковская. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 216 с.

ISBN 978-5-7996-1254-2

Предназначено для студентов всех форм обучения программ подготовки бакалавров по направлению 140400, специалистов – 140200. В пособии приведены математические модели электрической системы и ее элементов, методы расчета симметричных коротких замыканий в ЭС с источниками конечной и бесконечной мощности, принципы исследования электромагнитных переходных процессов при однократном нарушении симметрии. Отдельная глава посвящена аналитическим методам расчета электромагнитных переходных процессов в электрических системах.

Библиогр.: 13 назв. Табл. 10. Рис. 125.

УДК 621.3.018.782.3(075.8)
ББК 31.21я73+31.27я73

ISBN 978-5-7996-1254-2

© Уральский федеральный университет, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Основной объект, изучаемый в дисциплине «Переходные процессы в электрических системах», — электрическая система. Как известно, под электрической системой (ЭС) понимается совокупность электрических станций, электрических сетей и узлов потребления, объединенных единым процессом производства, передачи и распределения электрической энергии.

Любую ЭС можно представить как совокупность силовых элементов (синхронные машины, трансформаторы, линии электропередачи, выпрямители, инверторы, электрические двигатели и т. п.), элементов управления (коммутирующая аппаратура, силовые выключатели), устройств автоматики (автоматические регуляторы возбуждения, скорости) и элементов защиты (разрядники, реакторы, предохранители). Поведение электрической системы определяется ее режимом — состоянием, которое характеризуется значениями мощностей, напряжений, частоты и других физических величин — параметров режима.

Режимы ЭС можно разделить на *установившиеся*, имеющие практически неизменные параметры, и *переходные* — с быстрым изменением параметров режима. Переходные режимы связаны с возникновением переходных процессов, при которых происходит изменение электрического состояния элементов системы, обусловленное как естественными причинами, так и работой устройств автоматики. В переходных процессах в результате действия определенных возмущающих воздействий происходят изменения во времени одного или нескольких параметров режима, которые описываются физическими законами.

Переходные процессы подразделяются на волновые, электромагнитные и электромеханические.

Волновые переходные процессы возникают, например, при ударах молнии в ЛЭП, а также при коммутациях электрических цепей с индуктивными или емкостными элементами. Опасность волновых процессов заключается в возможности появления во время их существования импульсных перенапряжений, недопустимых для изоляции электротехники. Они являются быстродействующими процессами, скорость изменения параметров 10^3 — 10^8 Гц. Последствиями волновых переходных процессов являются перенапряжения, приводящие

к повреждению изоляции элементов ЭС и т. п., при этом не происходит изменения относительного положения роторов электрических машин и скорости их вращения.

Электромеханические переходные процессы являются низкочастотными. Скорость их протекания изменяется в пределах 10^{-1} —50 Гц. Происходит изменение как электрических, так и механических параметров режима.

В данном пособии будут подробно рассмотрены электромагнитные переходные процессы, которые возникают:

- при включении и отключении двигательных и других агрегатов;
- в результате коротких замыканий (КЗ) и простых замыканий;
- при местной несимметрии;
- при работе форсировки возбуждения, регуляторов возбуждения, автоматов гашения поля;
- в результате несинхронного включения синхронных машин (СМ).

Электромагнитные переходные процессы сопровождаются изменением электромагнитного состояния элементов ЭС. Механические параметры режима остаются неизменными. Скорость протекания — 50–150 Гц. Из всего многообразия электромагнитных переходных процессов наиболее распространенными являются процессы, вызванные короткими замыканиями.

Короткое замыкание в электроустановке — всякое случайное или преднамеренное, непредусмотренное нормальным режимом работы электрическое соединение различных точек (фаз) электроустановки друг с другом или с землей, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту КЗ, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима.

КЗ бывают симметричными (трехфазные) и несимметричными (однофазные, двухфазные на землю, двухфазные междуфазные).

При КЗ в энергосистемах:

- резко увеличивается ток в некоторых ветвях системы, особенно в месте КЗ; в других ветвях увеличение тока может быть небольшим;
- значительно снижается напряжение в узлах ЭС; при трехфазном КЗ ($K^{(3)}$) напряжение в точке КЗ снижается до нуля, при несим-

метричных КЗ (двухфазное — $K^{(2)}$, однофазное — $K^{(1)}$, двухфазное на землю — $K^{(1,1)}$) напряжение в точке к. з. частично сохраняется;

- искажается симметрия напряжений и токов при несимметричных КЗ, в результате чего увеличивается электромагнитное и электростатическое влияние линий электропередачи (ЛЭП) на линии связи и другие объекты;

- увеличивается тепловое действие токов, приводящее к повреждению изоляции, спеканию контактов электроаппаратуры и т. п.;

- динамическим действием токов КЗ являются механические усилия, повреждающие конструкции электрических машин и аппаратов.

Необходимо отметить, что потребители (нагрузка) в ЭС очень чувствительны к снижению напряжения. Так, например, асинхронные двигатели (АД), составляющие до 50 % нагрузки, при снижении напряжения затормаживаются, что приводит к увеличению тока нагрузки и дальнейшему снижению напряжения на ее зажимах. Появляется опасность нарушения устойчивости параллельной работы электрических машин (ЭМ) в системе, которая в этом случае распадается на части, работающие несинхронно. В результате происходит длительное нарушение электроснабжения потребителей, приводящее к огромному материальному ущербу.

Для анализа процессов, связанных с изменением электромагнитных величин, происходящих при КЗ, вводятся следующие понятия: *режимные условия, расчетные условия, расчетная схема КЗ*.

КЗ является случайным событием. Совокупность параметров режима КЗ образует множество вероятностных параметров. В то же время параметры оборудования образуют множество детерминированных параметров. Для осуществления проверки электрооборудования по режиму КЗ необходимо сопоставить вероятностные параметры этого режима с детерминированными параметрами электрооборудования, для чего вероятностные параметры режима КЗ преобразуются в условно детерминированные параметры режима расчетных условий КЗ (режимные условия).

Наиболее тяжелые и высоковероятные расчетные условия КЗ сформулированы в нормативных документах на основе опыта эксплуатации электроустановок, анализа отказов электрооборудования и последствий КЗ, использования соотношений параметров режима КЗ, вытекающих из теории переходных процессов в электроустанов-

ках, и определяются индивидуально для каждого элемента электроустановки (расчетные условия).

Эксплуатация электроустановки рассчитана на перспективу не менее чем 5 лет после ввода ее в эксплуатацию, при этом имеется в виду, что работать установка будет в продолжительном установившемся режиме. На его основе составляется расчетная схема, которая включает в себя все элементы электроустановки и примыкающей части энергосистемы. В отдельных случаях допускается не учитывать некоторые элементы.

В соответствии с ПУЭ по режиму КЗ можно не проверять некоторые проводники и электрические аппараты, защищенные плавкими предохранителями, а также проводники и аппараты в цепях маломощных неответственных потребителей, имеющих резервирование в электрической или технологической части. В таком случае должны быть исключены возможности взрыва или пожара.

Подавляющее число замыканий (85 %), происходящих в ЭС, обусловлено соединением с землей. Трехфазное короткое замыкание является очень редким (5 %), но изучение процессов, происходящих при этом виде КЗ, имеет первостепенное значение, поскольку их последствия самые тяжелые для ЭС. Большая часть КЗ дуговые, как правило, самоликвидирующиеся. Реже происходят металлические КЗ, при которых фазы электроустановки соединяются между собой или с землей.

Существующие методы расчета и анализа электромагнитных переходных процессов при трехфазных КЗ можно разбить на две группы: аналитические и практические.

В основу аналитического метода расчета положен анализ электромагнитных процессов по уравнениям Парка–Горева. Он позволяет для простейшей системы, состоящей из одного синхронного генератора (СГ), с высокой точностью определить значение тока при внезапном КЗ в начальный момент времени. При переходе к схемам с несколькими генераторами задача точного расчета переходного процесса усложняется. Появляется необходимость учета возникающих качаний генераторов и поведения присоединенных нагрузок, а также изменения свободных токов в каждом из генераторов, связанных между собой. При наличии автоматического регулирования возбуждения (АРВ) аналогичная связь имеется между приращениями вынужденных токов. Поэтому применение аналитического метода

весьма ограниченно. Его можно рассматривать лишь как эталон для оценки других методов расчета. Все расчеты переходных процессов при КЗ базируются на решении дифференциальных уравнений, описывающих поведение системы при временных изменениях параметров режима.

При решении многих практических задач не требуется знания точных результатов, поэтому можно использовать приближенные инженерные методы, которые рассматриваются далее. Практический подход, применяемый для решения всех инженерных задач и использующий мгновенные значения параметров режима, позволяет перейти от дифференциальных уравнений к алгебраическим и тригонометрическим.

Несмотря на различие ситуаций, условий и мест возникновения КЗ, подходы к расчету токов КЗ почти во всех случаях имеют много общего и основываются на одних и тех же понятиях и допущениях.

На первом этапе анализа выделяются общие подходы, применяемые при расчетах всех видов КЗ. На втором — детально рассматриваются практические методы расчета симметричных трехфазных КЗ. Далее приведена методика анализа несимметричных КЗ, рассмотрены особенности расчета в сетях 35 кВ и ниже, а также характер изменения токов в обмотках синхронных машин при протекании электромагнитного переходного процесса.

Для выбора и проверки электрооборудования допускаются упрощенные методы расчета токов КЗ, если их погрешность не превышает 5—10 % (10 % — до 1 кВ).

При этом определяют:

- начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ и значение этой составляющей в произвольный момент времени вплоть до расчетного времени размыкания поврежденной цепи;
- начальное значение апериодической составляющей тока КЗ и значение этой составляющей в произвольный момент времени вплоть до расчетного времени размыкания поврежденной цепи (для электроустановок напряжением до 1 кВ значение активного сопротивления сравнимо со значением реактивного сопротивления короткозамкнутой цепи, поэтому апериодическая составляющая затухает быстро);
- ударный ток КЗ.

Все расчеты коротких замыканий выполняются в соответствии с требованиями нормативных документов:

- ГОСТ 28249–93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ;
- ГОСТ 52735–07. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ (не распространяется на электроустановки напряжением 750 кВ и выше);
- ГОСТ 29176–91. Короткие замыкания в электроустановках. Методика расчета в электроустановках постоянного тока;
- ГОСТ Р 30323–95. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов КЗ;
- ГОСТ 26522–85. Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы виды переходных процессов, происходящих в электрических системах? Их основные отличительные признаки.
2. Что такое расчетные и режимные условия при анализе переходного процесса?
3. Как классифицируются виды КЗ?
4. В чем проявляются основные последствия КЗ?
5. Как обозначаются симметричные и несимметричные КЗ?
6. Каковы основные методы расчета и анализа КЗ?

1. СИММЕТРИЧНОЕ КЗ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Симметричным является КЗ между тремя фазами в трехфазной электроэнергетической системе, при таком замыкании все фазы остаются в одинаковых условиях. Все остальные виды коротких замыканий являются несимметричными, поскольку при каждом из них фазы находятся в разных условиях, а следовательно, системы токов и напряжений в той или иной мере искажены.

Несимметричные КЗ наиболее часто происходят в энергосистемах. Трехфазные КЗ составляют примерно 5 % от общего числа аварийных режимов. При данном виде КЗ токи во всех фазах равны и достигают, как правило, максимальных значений, поэтому оно может быть решающим для окончательного суждения относительно возможности работы в условиях КЗ.

1.1. Трехфазное КЗ в простейшей электрической цепи

Рассматривается простейшая электрическая система (рис. 1.1), в которой произошло трехфазное КЗ $K^{(3)}$. Условно принято, что взаимоиндукция между фазами сосредоточена на одном участке. К зажимам схемы подведено синусоидальное напряжение неизменной амплитуды и частоты:

$$u_{\eta} = U_m \sin(\omega t + \alpha_{\eta}),$$

где α_{η} — начальная фаза, $\alpha_A = \alpha$, $\alpha_B = \alpha - 2\pi/3$, $\alpha_C = \alpha + 2\pi/3$; η — фаза (A, B, C).

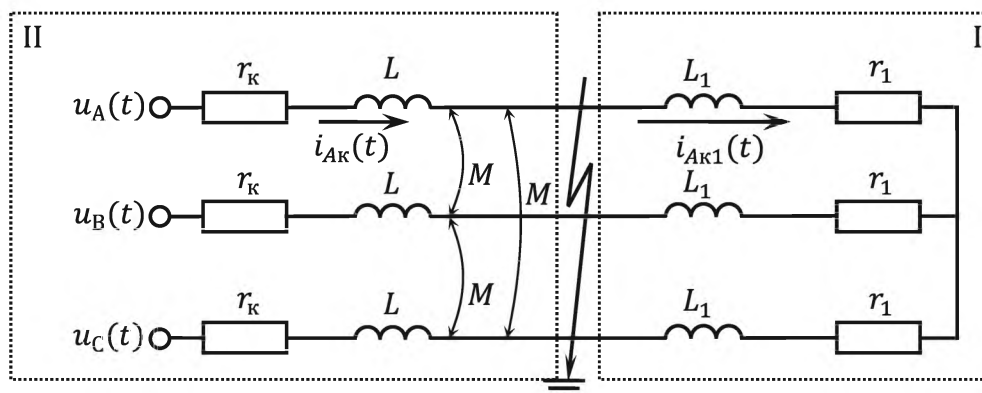


Рис. 1.1. Схема простейшей электрической сети

В нормальном режиме по сети протекает ток

$$i_{\eta} = I_m \sin(\omega t + \alpha_{\eta} - \varphi),$$

где I_m — амплитуда тока в нормальном режиме, $I_m = U_m/Z$. Здесь Z — модуль полного сопротивления; φ — аргумент при сопротивлении.

КЗ условно делит схему на две независимые части I и II с нулевым значением напряжения в точке замыкания.

Переходный процесс рассматривается в «особой» фазе A. Опуская ее индекс, имеем для правой части цепи (I на рис. 1.1):

$$r_1 i_{k1} + L_1 \frac{di_{k1}}{dt} = 0, \quad i_{k1} \equiv i_{Ak1}(t). \quad (1.1)$$

Уравнение (1.1) является обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка с разделяющимися переменными. Его решение имеет вид

$$i_{k1}(t) = i_0 e^{-t/\tau_1},$$

где i_0 — мгновенное начальное значение тока в фазе (ток предшествующего режима); τ_1 — постоянная времени цепи, $\tau_1 = L_1/r_1$.

В нормальном режиме в момент времени $t = 0$

$$i_A(t = 0) = I_m \sin(\alpha - \varphi). \quad (1.2)$$

Из формулы (1.2) следует, что ток в фазе A может отсутствовать и переходный процесс не возникнет, если $\alpha - \varphi = 0$. При этом в двух других фазах токи равны по модулю и противоположны по направлению ($\xi = \pm 2\pi/3$):

$$i_{Bk(t=0)} = I_m \sin(\alpha - \varphi - \xi) = -I_m \sin(\xi),$$

$$i_{Ck(t=0)} = I_m \sin(\alpha - \varphi + \xi) = I_m \sin(\xi).$$

При $\alpha - \varphi = \pm \pi/2$ ток в фазе A достигает максимального значения. В цепи с преобладанием индуктивных элементов $\varphi \approx \pi/2$, поэтому условием максимума тока i_0 в фазе A можно считать равенство $\alpha = 0$.

Во всех трех фазах правой части цепи токи имеют апериодический характер. Во время переходного процесса они затухают до нуля с постоянной времени τ_1 , зависящей от соотношения реактивного и активного сопротивления (рис. 1.2, a).

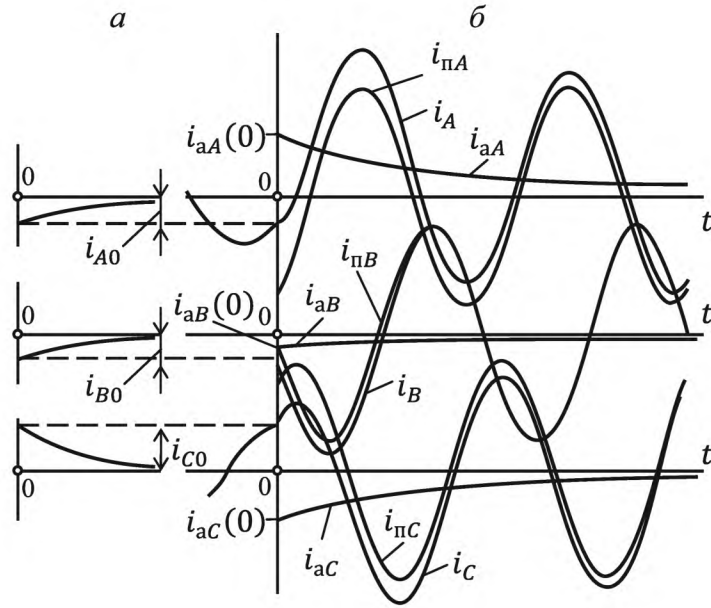


Рис. 1.2. Пример осциллограммы токов КЗ в фазах электрической сети для правой (а) и левой (б) части схемы

Рассмотрим переходный процесс в части цепи, расположенной слева от точки КЗ (II на рис. 1.1). Дифференциальное уравнение, описывающее переходный процесс в фазе А, имеет вид

$$r_K i_{AK} + L \frac{di_{AK}}{dt} + M \frac{di_{BK}}{dt} + M \frac{di_{CK}}{dt} = u_A,$$

и с учетом условия $i_{AK} = -(i_{BK} + i_{CK})$ записывается как

$$r_K i_{AK} + L_K \frac{di_{AK}}{dt} = u_A, \quad (1.3)$$

где L_K — индуктивность цепи КЗ, $L_K = (L - M)$.

Уравнение (1.3) является неоднородным дифференциальным уравнением. Его решение получается как сумма двух решений: общего решения однородного уравнения (апериодическая составляющая тока КЗ) и частного решения неоднородного уравнения, дающего значение периодической составляющей тока КЗ:

$$i_{пK}(t) = I_{mK} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K),$$

где I_{mK} — амплитудное значение периодической составляющей тока КЗ, $I_{mK} = U_m / Z_K$. Здесь Z_K — модуль полного сопротивления,

$Z_K = \sqrt{r_K^2 + x_K^2}$, где x_K — индуктивность сопротивления цепи, $x_K = \omega L_K$; φ_K — аргумент полного сопротивления Z_K , $\varphi_K = \text{arctg}(x_K/r_K)$.

Апериодическая составляющая тока КЗ определяется как

$$i_{ак}(t) = i_{а(0)} e^{-t/\tau_a},$$

где $i_{а(0)}$ — начальное значение апериодической составляющей, которое рассчитывается из условия непрерывности тока в цепи; τ_a — постоянная времени цепи, $\tau_a = L_K/r_K$.

Полный ток фазы A во время переходного процесса может быть представлен в виде

$$\begin{aligned} i_{AK}(t) &= i_{пк}(t) + i_{ак}(t) = \\ &= I_{mK} \sin(\omega t + \alpha_A - \varphi_K) + i_{а(0)} e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Для момента времени $t = 0$

$$\begin{aligned} i_{AK(t=0)} &= i_{пк}(0) + i_{ак}(0) = \\ &= I_{mK} \sin(\alpha_A - \varphi_K) + i_{а(0)} = i_{A(t=0)}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где $i_{A(t=0)}$ — предшествующее значение тока в фазе A к началу переходного процесса, $i_{A(t=0)} = I_m \sin(\alpha_A - \varphi)$.

Начальное значение апериодической составляющей тока КЗ из формулы (1.5) находится достаточно просто ($t = 0$):

$$i_{а(0)} = I_m \sin(\alpha_A - \varphi) - I_{mK} \sin(\alpha_A - \varphi_K).$$

Запишем полное выражение тока в фазе A :

$$\begin{aligned} i_{AK}(t) &= I_{mK} \sin(\omega t + \alpha_A - \varphi_K) + \\ &+ [I_m \sin(\alpha_A - \varphi) - I_{mK} \sin(\alpha_A - \varphi_K)] e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \end{aligned}$$

Анализ переходного процесса может проводиться при условии, что до КЗ цепь была не нагружена ($Z \rightarrow \infty$), тогда $I_m \rightarrow 0$. В этом случае полный ток рассчитывается по упрощенному выражению

$$\begin{aligned} i_{AK}(t) &= I_{mK} \sin(\omega t + \alpha_A - \varphi_K) - \\ &- I_{mK} \sin(\alpha_A - \varphi_K) e^{-\frac{t}{\tau_a}}. \end{aligned}$$

Апериодическая составляющая тока имеет максимальное значение при $\alpha - \varphi_k = \pm \pi/2$. Она может отсутствовать в одной из фаз ($\alpha - \varphi_k = 0$), но в двух других обязательно присутствует.

Для определения условий, при которых полный ток будет достигать максимального значения, необходимо совместно рассмотреть два уравнения: $\partial i_{AK}(t)/\partial t = 0$ и $\partial i_{AK}(t)/\partial \alpha = 0$. Отсюда получается условие экстремума функции $\text{tg}(\alpha - \varphi_k) = -\omega\tau_a = -x_k/r_k = \text{tg}(-\varphi_k)$, т. е. максимум полного тока достигается в фазе при $\alpha = 0$ и $I_m = 0$.

Если в цепи преобладает индуктивное сопротивление ($x_k \gg r_k$), то $\varphi_k \approx \pi/2$. При этом будут совпадать условия достижения максимальных значений апериодической составляющей и полного тока КЗ. Последнее обстоятельство используется для определения момента времени, при котором достигается максимальное значение полного тока.

Допустим, $\alpha - \varphi_k = -\pi/2$, тогда $i_k(t) = I_{mk} \sin(\omega t - \pi/2) + I_{mk} e^{-t/\tau_a}$. Полагая $i_{ak}(t) = I_{mk} e^{-t/\tau_a}$ постоянной величиной, получаем, что при $\sin(\omega t - \pi/2) = 1$ или $t = \pi/\omega = 0,01$ с полный ток достигает максимального значения.

Таким образом, если в цепи преобладает реактивное сопротивление ($x_k/r_k > 5$), то при коротком замыкании после холостого хода максимум полного тока достигается в одной из фаз примерно через $t = 0,01$ с после начала КЗ. При этом начальное значение апериодической составляющей также максимально. На рис. 1.3 изображены апериодическая $i_{ak}(t)$, периодическая $i_{пк}(t)$ составляющие и полный ток $i_k(t)$, которые характеризуют переходный процесс в рассмотренных условиях.

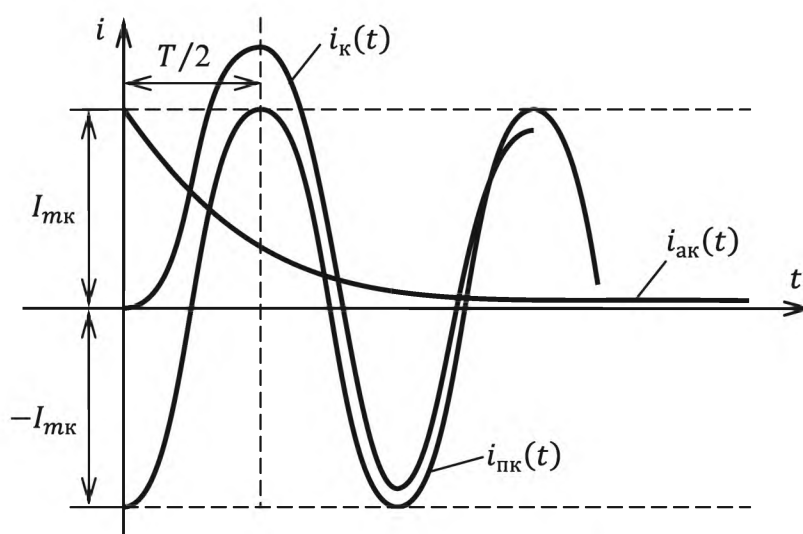


Рис. 1.3. Изменение тока в фазе

Ударный ток КЗ. Наибольшее мгновенное значение ток КЗ в одной из фаз трехфазной электрической цепи имеет в момент прохождения напряжения этой фазы через нулевое значение, причем до возникновения КЗ ток в цепи носит емкостной характер или отсутствует. Это значение называется ударным током:

$$i_y = k_y I_{mk},$$

где k_y — ударный коэффициент при $x_k/r_k \geq 5$, $k_y = 1 + e^{-0,01/\tau_a}$. Здесь τ_a — постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ. В данном случае считается, что время наступления максимума полного тока составляет 0,01 с. Величина ударного коэффициента определяет превышение максимальным мгновенным значением полного тока амплитуды периодической составляющей тока КЗ.

Ударный коэффициент изменяется в пределах $1 \leq k_y < 2$, причем большее значение k_y соответствует большему значению постоянной времени τ_a . При $x_k/r_k < 5$ ударный коэффициент тока КЗ рекомендуется определять по формуле

$$k_y = 1 + e^{\frac{-0,01(0,5+\varphi_k/\pi)}{\tau_a}}, \quad (1.6)$$

где φ_k — угол сдвига по фазе между периодической составляющей тока КЗ и напряжением ($\varphi_k = \arctg(x_k/r_k)$).

Действующее значение полного и ударного токов КЗ. Полный ток в фазе является несинусоидальным, поэтому его действующее значение $I_{\eta kt}$ в произвольный момент времени определяется как среднеквадратичное значение за один период T , в середине которого находится рассматриваемый момент времени:

$$I_{\eta kt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{(t-T/2)}^{(t+T/2)} i_{\eta k}^2(t) dt}.$$

Если пренебречь изменением апериодической составляющей тока в течение времени $t \in (t - T/2, t + T/2)$, то значение $I_{\eta kt}$ может быть найдено по формуле

$$I_{\eta kt} = \sqrt{I_{\eta \text{пк},t}^2 + i_{\eta \text{ак},t}^2}. \quad (1.7)$$

Действующее значение ударного тока определяется как

$$I_y = \sqrt{I_{\text{пк}}^2 + (\sqrt{2}I_{\text{пк}}e^{-0,01/\tau_a})^2} = I_{\text{пк}} \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}.$$

Приближенное определение периодической составляющей тока КЗ. Амплитудное значение периодической составляющей тока определяется по выражению

$$I_{m\text{к}} = \frac{U_m}{\sqrt{r_{\text{к}}^2 + x_{\text{к}}^2}} = \frac{U_m}{x_{\text{к}}} \frac{1}{\sqrt{1 + (r_{\text{к}}/x_{\text{к}})^2}},$$

где $U_m/x_{\text{к}}$ — амплитудное значение той же составляющей, посчитанное в предположении равенства нулю активного сопротивления цепи $r_{\text{к}} = 0$, $U_m/x_{\text{к}} = I_{m\text{к}(r=0)}$.

Отношение $I_{m\text{к}(r=0)}/I_{m\text{к}}$ с учетом требования точности расчета в пределах 5 % может быть найдено по формуле

$$\frac{I_{m\text{к}(r=0)}}{I_{m\text{к}}} = \sqrt{1 + \left(\frac{r_{\text{к}}}{x_{\text{к}}}\right)^2} \approx 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{r_{\text{к}}}{x_{\text{к}}}\right)^2 \leq 1,05,$$

откуда $x_{\text{к}}/r_{\text{к}} \geq 3$. В большинстве случаев отношение реактивного к активному сопротивлению превышает значение 3, поэтому расчет периодической составляющей тока КЗ можно проводить без учета активного сопротивления цепи (погрешность расчета не превысит 5 %). Учет активного сопротивления необходим при определении апериодической составляющей тока КЗ, фазы $\varphi_{\text{к}}$ в установках с напряжением ниже 1 кВ и в кабельных линиях с малым индуктивным сопротивлением между фазами.

1.2. Основные допущения расчетов токов КЗ в сетях напряжением выше и ниже 1 кВ

Для значительного облегчения оценочных (ручных) алгоритмов расчета тока КЗ вводят ряд упрощений, которые составляют основные расчетные допущения. Под допущениями понимаются условия, предопределяющие учет или отказ от учета тех или иных характери-

стик элементов ЭС. Формулируются допущения для конкретных расчетных условий исходя из поставленной задачи.

К основным допущениям относятся следующие положения:

- 1) рассматриваемая ЭС строго симметрична при К⁽³⁾;
- 2) при расчетах токов КЗ допускается не учитывать сдвиг по фазе ЭДС различных синхронных машин и изменение их частоты вращения, если продолжительность КЗ не превышает 0,5 с, а для электродвигателей — 0,2 с, т. е. не учитывать качания.

Также не учитываются:

- 1) насыщение магнитных систем электрических машин;
- 2) ток намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;
- 3) межсистемные связи, выполненные с помощью электропередачи (вставки) постоянного тока.

Допускается:

- 1) при отсутствии данных о фактических коэффициентах трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов использовать приближенный способ их учета. Он состоит в замене фактических коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов отношением средних номинальных напряжений сетей соответствующих ступеней напряжения. При этом рекомендуется использовать следующую *шкалу средних номинальных напряжений* сетей: 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 27; 37; 115; 154; 230; 340; 515 кВ (свыше 1 кВ); 0,23; 0,4; 0,525; 0,69 (до 1 кВ);

- 2) приближенно учитывать электроприемники, сосредоточенные в отдельных узлах исходной расчетной схемы;

- 3) приближенно учитывать затухание апериодической составляющей тока КЗ, если исходная расчетная схема содержит несколько независимых контуров;

- 4) принимать численно равными активное сопротивление и сопротивление постоянному току любого элемента исходной расчетной схемы;

- 5) пренебрегать высшими гармониками при расчете несимметричных коротких замыканий;

- 6) наиболее удаленную от расчетной точки КЗ часть электроэнергетической системы представлять в виде одного источника энергии с неизменной по амплитуде ЭДС и результирующим эквивалентным индуктивным сопротивлением x_c . Здесь следует ЭДС источника

принимать равной среднему номинальному напряжению сети, связывающей удаленную и основную части электроэнергетической системы. Результирующее эквивалентное сопротивление x_c определяется исходя из известного тока I_c от эквивалентруемой части системы при КЗ в узловой точке указанной сети:

$$x_c = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3}I_c}. \quad (1.8)$$

При расчетах токов следует учитывать влияние каждой нагрузки, если ток в месте замыкания от этой нагрузки составляет не менее 5 % тока в точке КЗ, определенного без учета нагрузки. В приближенных расчетах допускается представление нагрузки как обобщенной.

В сетях классов напряжения выше 1 кВ допускается не учитывать:

- влияние активных сопротивлений различных элементов исходной расчетной схемы на амплитуду периодической составляющей тока, если активная составляющая результирующего эквивалентного сопротивления расчетной схемы относительно точки КЗ не превышает 30 % от индуктивной составляющей результирующего эквивалентного сопротивления;

- поперечную емкость воздушных линий электропередачи напряжением 110–220 кВ, если их длина не превышает 200 км, и напряжением 330–500 кВ, если их длина не превышает 150 км.

При расчетах токов КЗ в сетях классов напряжения ниже 1 кВ имеются следующие особенности:

- разрешается не учитывать влияние асинхронных электродвигателей, если их суммарный номинальный ток не превышает 1,0 % от начального значения периодической составляющей тока в месте КЗ, рассчитанного без учета электродвигателей;

- следует учитывать автономные источники электроэнергии и электродвигатели, непосредственно примыкающие к точке КЗ.

Приведенные допущения значительно облегчают выполнение оценочных (ручных) расчетов тока и составляют основу алгоритма программных средств.

В практических расчетах наиболее строго определяется значение тока КЗ в начальный момент времени, т. е. сверхпереходный ток $I''_{к0}$. Погрешность расчета составляет 5 %. Если рассчитать ток


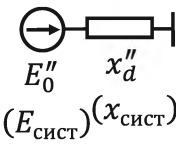

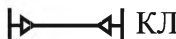
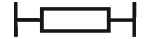

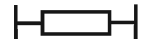

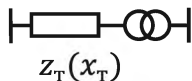
в произвольный момент времени, точность расчета существенно уменьшается и погрешность в аварийной ветви может достигать 10–15 %. Для остальных ветвей схемы ошибка вычислений обычно оказывается еще больше. Она растет по мере удаления от точки КЗ и увеличения времени переходного процесса.

1.3. Математические модели электрической системы и ее элементов. Преобразование схемы замещения

Математическая модель ЭС определяется по составляющим ее элементам. По сравнению с расчетами установившихся режимов существенно меняются модели генераторных и нагрузочных узлов. Параметры остальных элементов остаются практически теми же. Руководствуясь приведенными ранее допущениями, для основных элементов электроэнергетических систем можно использовать уже известные из расчетов установившихся режимов схемы замещения (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Схемы замещения и их параметры

Наименование элемента	Изображение на схеме		Расчетные выражения
	принципиальной	замещения	
Синхронная машина			E''_0 по формуле (1.9); $x''_d = x''_{d*} U_{\text{ном}}^2 / S_{\text{ном}}$
Система		$(E_{\text{сист}})'' (x_{\text{сист}})''$	$E_{\text{сист}} = U_{\text{сист}} / \sqrt{3};$ $x_{\text{сист}} = U_{\text{сист}}^2 / S_{\text{кз}};$ или по формуле (1.8)
ЛЭП: воздушные (ВЛ), кабельные (КЛ)	 	 $Z_{\text{л}} (x_{\text{л}})$	$Z_{\text{л}} = Z_{\text{уд}} \ell;$ $x_{\text{л}} = x_{\text{уд}} \ell$
Реакторы обычного типа		 $x_{\text{р}}$	Справочные данные
Трансформатор		 $Z_{\text{т}} (x_{\text{т}})$	$r_{\text{т}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} U_{\text{В ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2};$ $x_{\text{т}} = \frac{u_{\text{к, \%}}}{100} \frac{U_{\text{В ном}}^2}{S_{\text{ном}}}$

Источники питания (синхронные генераторы и система) в практических расчетах представляются ЭДС за некоторым сопротивлением, значения которых зависят от допущений, принятых при расчетах. Причины использования именно таких значений в схемах замещения электрических машин подробно будут рассмотрены в гл. 4.

При расчете действующего значения периодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени $I''_{п0}$ все синхронные машины (генераторы, двигатели, синхронные компенсаторы), имеющие демпферные обмотки, вводятся в схему замещения сверхпереходной ЭДС E''_0 за сверхпереходным сопротивлением x'' . Если влияние демпферных обмоток не учитывается, то значения ЭДС и сопротивления принимаются соответственно E' и x' .

Для синхронных машин сверхпереходное сопротивление x'' можно оценить, зная значения сверхпереходных сопротивлений по продольной x''_d и поперечной x''_q осям, как среднеарифметическое или среднегеометрическое этих величин. Чаще всего принимают $x'' = x''_d$.

Любой генераторный (двигательный) элемент ЭС характеризуется в нормальном (рабочем) режиме значением напряжения на его зажимах U_0 , величиной фазного тока I_0 , коэффициентом мощности $\cos \varphi_0$. В начальный момент КЗ его сопротивление мгновенно меняется, становясь равным сверхпереходному значению x'' , поэтому векторная диаграмма (рис. 1.4), соответствующая началу переходного процесса, позволяет найти значение ЭДС.

$$E''_0 = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \pm I_{\text{ном}} x''_d \sin \varphi_{\text{ном}}\right)^2 + (I_{\text{ном}} x''_d \cos \varphi_{\text{ном}})^2}. \quad (1.9)$$

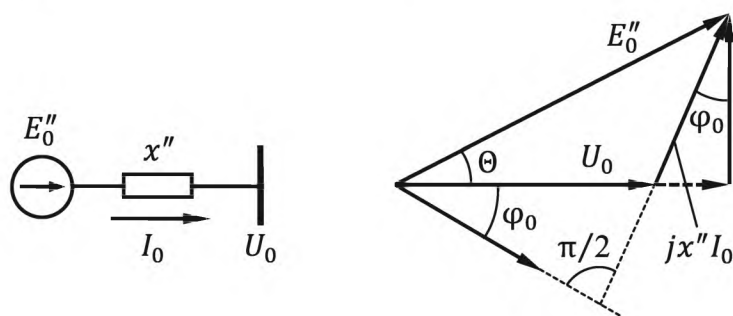


Рис. 1.4. Схема замещения и векторная диаграмма генераторного (двигательного) элемента ЭС

В выражении (1.9) знак «+» в первой скобке берется для электрической машины, выдающей реактивную мощность (синхронные

генераторы, перевозбужденные синхронные двигатели или компенсаторы); знак «–» используется для машины, принимающей реактивную мощность из сети (недовозбужденные синхронные двигатели или компенсаторы, асинхронные двигатели).

В практических расчетах значение E_0'' часто определяется приближенно:

$$E_0'' = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} \pm I_{\text{ном}} x_d'' \sin \varphi_{\text{ном}}.$$

Исходные параметры схемы замещения воздушных линий электропередачи определяются при помощи класса напряжения, на который они подключены к электрической системе. Как правило, при расчетах КЗ не учитываются активные составляющие сопротивлений воздушных линий. Емкостные проводимости на землю учитываются для линий, работающих при напряжении 220 кВ и выше. Для кабельных линий учет активного сопротивления обязателен.

Значения E_0'' и x'' определяются и для всех асинхронных машин (АМ), а также для обобщенной нагрузки (ОН), в которую входят мелкие и крупные двигатели, печная нагрузка и т. д. Для АМ при определении x'' используют пусковой ток $I_{\text{пуск}}$, значение которого обычно задано по отношению к номинальным условиям:

$$x_o'' = 1/I_{\text{п}(*)},$$

где $I_{\text{п}(*)} = I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$. Значение ЭДС можно определять по выражению (1.9).

В табл. 1.2 приведены некоторые значения $x_{(*)}''$ и $E_{0(*)}''$ для различных видов электрических машин. Для практического использования данных таблицы необходимо пересчитать величины ЭДС и сопротивлений, приведенные в таблице в относительных единицах:

$$E_0'' = E_{0(*)}'' U_{\text{ном}};$$

$$x'' = x_{(*)}'' \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}},$$

где $U_{\text{ном}}$, $S_{\text{ном}}$ — номинальные напряжение и мощность соответствующего генераторного (двигательного) элемента.

Представление нагрузки при расчете токов КЗ должно быть выполнено с учетом элементов электрической сети, ее образующих.

Таблица 1.2

Значения $x''_{(*)}$ и $E''_{0(*)}$ некоторых генераторных (двигательных) элементов ЭС

Генераторные (двигательные) элементы ЭС	$x''_{(*)}$, о. е.	$E''_{0(*)}$, о. е.
Турбогенераторы мощностью до 100 МВт	0,125	1,08
« мощностью 100–500 МВт	0,20	1,13
Гидрогенераторы с демпферными обмотками	0,20	1,13
« без демпферных обмоток	0,27	1,18
Синхронный двигатель	0,20	1,10
Синхронный компенсатор	0,20	1,20
Асинхронный двигатель	0,20	0,90
Обобщенная нагрузка	0,35	0,85

Если нагрузка ЭС состоит из постоянных сопротивлений, то ее учет не составляет трудностей. В схеме замещения она представлена постоянным полным сопротивлением (рис. 1.5, а). Однако большую часть нагрузки (до 50 %) составляют асинхронные двигатели, сопротивление которых зависит от величин напряжения U_H в узле. Эти зависимости нелинейны и затрудняют учет нагрузки.

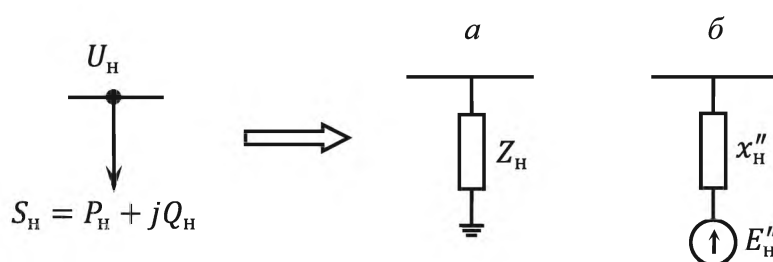


Рис. 1.5. Схемы замещения нагрузки постоянным сопротивлением (а), сверхпереходными ЭДС и сопротивлением (б)

Для упрощенных расчетов нагрузка может быть представлена постоянной реактивностью $x_{H(*)} = 1,2$ о. е.

$$x_H = x_{H(*)} \frac{U_H^2}{S_H}.$$

При значительном количестве асинхронных двигателей, расположенных вблизи точки КЗ, в составе нагрузки, рекомендуется учитывать ее как некоторый источник с ЭДС и сопротивлением (рис. 1.5, б), т. е. как обобщенную нагрузку

$$E''_H = 0,85 \frac{U_H}{\sqrt{3}};$$

$$x''_H = 0,35 \frac{U_H^2}{S_H},$$

где 0,85 и 0,35 — относительные значения ЭДС и сопротивления типового узла нагрузки; U_H — номинальное напряжение в узле нагрузки; S_H — номинальная мощность.

Если нагрузка является комплексной, а комплексная нагрузка — это комбинация различных типов электроприемников в узле нагрузки, то приближенно ее параметры можно рассчитывать в соответствии с данными табл. 1.3.

Таблица 1.3

Параметры узлов обобщенной нагрузки*

Состав потребителей узла, %						Значение $Z_{1H(ном)}$, о. е., при напряжении узла		$E_{H(ном)}$, о. е.
СД	АД	АДН	П	ЭТ	Л	6(10) кВ	35(110) кВ	
100	—	—	—	—	—	$0,04 + j \cdot 0,15$	$0,04 + j \cdot 0,25$	1,11
—	100	—	—	—	—	$0,03 + j \cdot 0,17$	$0,03 + j \cdot 0,27$	0,936
25	10	40	10	11	4	$0,03 + j \cdot 0,43$	$0,04 + j \cdot 0,54$	0,865
50	10	15	—	—	25	$0,1 + j \cdot 0,33$	$0,15 + j \cdot 0,43$	1,03
—	—	35	—	—	65	$0,17 + j \cdot 0,23$	$0,2 + j \cdot 0,34$	0,788
50	50	—	—	—	—	$0,02 + j \cdot 0,2$	$0,02 + j \cdot 0,31$	1,0

* В таблице приняты обозначения: СД — синхронные электродвигатели напряжением свыше 1 кВ; АД — асинхронные электродвигатели напряжением выше 1 кВ; АДН — асинхронные электродвигатели напряжением до 1 кВ; П — преобразователи; ЭТ — электротермические установки; Л — лампы освещения.

Схемы замещения и расчет параметров схем замещения линий электропередач, трансформаторов и реакторов обычного типа приведены в табл. 1.1.

Сдвоенный реактор (рис. 1.6) имеет схему замещения в виде трехлучевой звезды, параметры которой выражаются через индуктивное сопротивление ветви x_L , измеряемое в отсутствие тока в другой ветви:

$$x_1 = -kx_L;$$

$$x_2 = x_3 = (1 + k)x_L,$$

где k — коэффициент, устанавливающий наличие электромагнитной связи между ветвями реактора. Значения x_L и k являются справочными данными [1], [2].

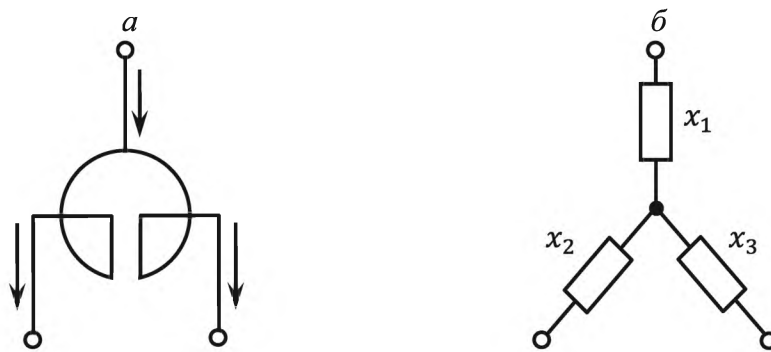


Рис. 1.6. Принципиальная схема сдвоенного реактора (а) и его схема замещения (б)

В силу принятых допущений схемы замещения силовых трансформаторов и автотрансформаторов для расчета токов КЗ могут быть такими же, как при расчете параметров установившегося режима. Сопротивления трансформатора без учета намагничивающего тока в общем случае характеризуются сопротивлениями КЗ u_k попарно взятых обмоток. При расщеплении одной из обмоток силового трансформатора на m частей схема замещения имеет вид $(m + 1)$ -лучевой звезды, и параметры схемы рассчитываются по выражениям:

$$Z_B = \left(1 - \frac{k_p}{4}\right) Z_{BH};$$

$$Z_{H1} = \dots = Z_{Hm} = \frac{k_p}{2} Z_{BH},$$

где k_p — коэффициент расщепления.

Приведение схемы замещения к одной ступени напряжения

При практическом расчете токов КЗ на первом этапе расчета каждому элементу электрической сети ставится в соответствие его схема замещения, тем самым формируется общая схема замещения всей электрической сети, в которой разные сопротивления и ЭДС в общем случае определяются на различных ступенях напряжения. Для облегчения расчетов выполняется приведение параметров схемы замещения к одной ступени напряжения, выбранной за основную, за счет исключения трансформаторных связей. Существует два типа приведения: «точное» и по шкале средних напряжений [3]. В первом случае используются точные значения коэффициентов трансформации, имеющих в ЭС трансформаторов, во втором — значения средних коэффициентов трансформации, рассчитанные по средним напряжениям ступеней.

Рассмотрим на конкретном примере приведение параметров схемы замещения ЭС к одной ступени напряжения.

Если привести параметры схемы замещения, показанной на рис. 1.7, к IV ступени напряжения, т. е. к напряжению U_{IV} , с учетом фактических коэффициентов трансформации, то для всех сопротивлений и ЭДС можно записать

$$E_I^{IV} = \tilde{E}_I = E_I \frac{U_{II}}{U_I} \frac{U_{III}}{U'_{II}} \frac{U_{IV}}{U'_{III}} = E_I k_I k_{II} k_{III},$$

где k_I, k_{II}, k_{III} — точные значения коэффициентов трансформации, $k_I = U_{II}/U_I$, $k_{II} = U_{III}/U'_{II}$, $k_{III} = U_{IV}/U'_{III}$.

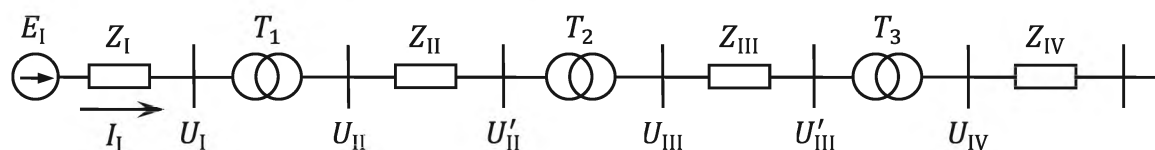


Рис. 1.7. Приведение параметров схемы замещения к одной ступени напряжения при использовании точных коэффициентов трансформации

При трансформации мощность на всех ступенях напряжения практически одинакова (потери мощности в идеальном трансформаторе отсутствуют), поэтому при изменении напряжения в k раз ток изменяется в $1/k$ раз. Приведенное значение тока I_I^{IV} определяется по выражению

$$I_1^{IV} = \tilde{I}_1 = I_1 \frac{1}{k_I k_{II} k_{III}}.$$

Сопротивления при приведении к другой ступени напряжения изменяются пропорционально произведению квадратов коэффициентов трансформации:

$$Z_1^{IV} = \tilde{Z}_1 = \frac{\tilde{E}_1}{\tilde{I}_1} = \frac{E_1}{I_1} k_I^2 k_{II}^2 k_{III}^2 = Z_1 k_I^2 k_{II}^2 k_{III}^2;$$

$$\tilde{Z}_{II} = Z_{II} k_{II}^2 k_{III}^2;$$

$$\tilde{Z}_{III} = Z_{III} k_{III}^2;$$

$$\tilde{Z}_{IV} = Z_{IV}.$$

Приближенное приведение параметров схемы замещения осуществляется по средним коэффициентам трансформации (рис. 1.8), что значительно сокращает время расчетов. В этом случае приведенные значения ЭДС \tilde{E}_1 , тока \tilde{I}_1 и сопротивления \tilde{Z}_1 рассчитываются как

$$\tilde{E}_1 = E_1 \frac{U_{II \text{ ср}}}{U_{I \text{ ср}}} \frac{U_{III \text{ ср}}}{U_{II \text{ ср}}} \frac{U_{IV \text{ ср}}}{U_{III \text{ ср}}} = E_1 \frac{U_{IV \text{ ср}}}{U_{I \text{ ср}}};$$

$$\tilde{I}_1 = I_1 \frac{U_{I \text{ ср}}}{U_{IV \text{ ср}}};$$

$$\tilde{Z}_1 = Z_1 \left(\frac{U_{IV \text{ ср}}}{U_{I \text{ ср}}} \right)^2.$$

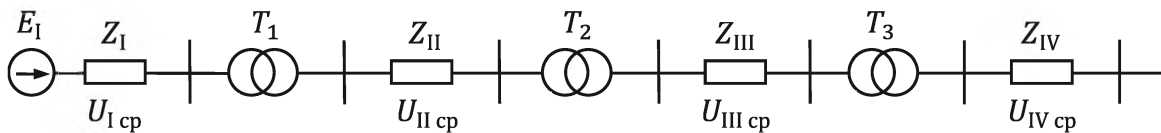


Рис. 1.8. Приведение параметров схемы замещения к одной ступени напряжения по средним коэффициентам трансформации

В ряде случаев приведение схемы замещения к одной ступени напряжения может выполняться в системе относительных единиц, но данный способ «удаления» из схемы замещения идеальных трансформаторов не имеет в настоящее время широкого распространения.

Приведение схемы замещения ЭС к простейшему виду

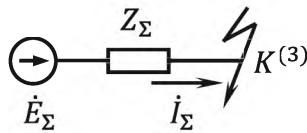


Рис. 1.9. Простейшая схема замещения сложной ЭС

Преобразования схемы замещения выполняются после приведения параметров схемы к одному классу напряжения, другими словами, преобразуется схема, не содержащая идеальных трансформаторов. Для эквивалентирования схемы замещения сложной ЭС к простейшему виду (рис. 1.9), которая составляется на одну фазу, используется ряд дополнительных преобразований. К ним относятся:

- сложение последовательно соединенных сопротивлений;
- замена параллельно соединенных элементов одним эквивалентным;
- преобразование треугольника в звезду и звезды в треугольник;
- преобразование звезды с произвольным числом лучей в схему полного многоугольника.

Часто при выполнении расчетов приходится преобразовывать схему замещения, имеющую вид, представленный на рис. 1.10, а, к виду на рис. 1.10, б.

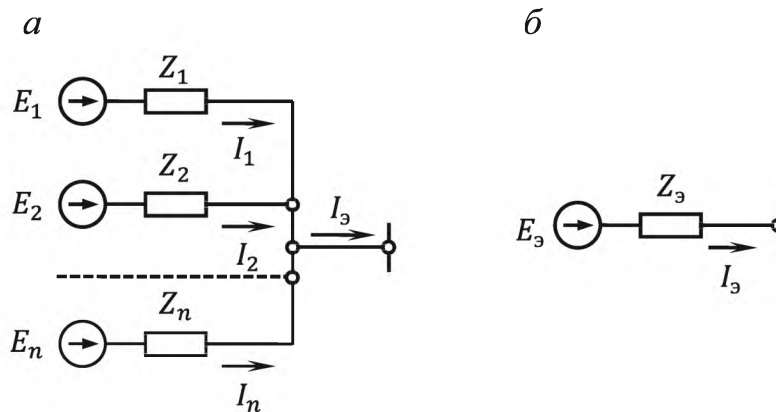


Рис. 1.10. Преобразование схемы замещения:
а — до преобразования; б — после преобразования

В результате преобразования находится эквивалентная ЭДС $E_э$ и эквивалентное сопротивление $Z_э$. Они рассчитываются по следующим выражениям:

$$E_э = Z_э \sum_{k=1}^n \frac{E_k}{Z_k};$$

$$Z_э = \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{Z_k} \right)^{-1},$$

где n — число параллельных ветвей; E_k, Z_k — ЭДС и сопротивление параллельной ветви k .

Подобные преобразования в сложной схеме зачастую связаны с большими вычислительными трудностями, поэтому вводятся дополнительные упрощающие допущения:

- при выполнении расчетов не учитывается нагрузка, кроме двигательной, подключенной непосредственно к месту возникновения КЗ;
- синхронные генераторы, к шинам которых подключена местная нагрузка, вводятся эквивалентной ЭДС $E_{(*)} = 1$; нагрузка в этом случае не учитывается;
- при отсутствии данных о составе нагрузки она может учитываться как обобщенная.

Для преобразованной схемы замещения (рис. 1.9) относительно точки КЗ рассчитываются результирующая ЭДС системы E_Σ и результирующее сопротивление $Z_\Sigma(x_\Sigma)$.

Основной задачей расчета переходного процесса при КЗ является нахождение тока в аварийной ветви. Желательно, чтобы эта ветвь в преобразованиях не участвовала, сохраняя свои параметры неизменными, для чего концы нагрузочных ветвей, ЭДС которых принимаются равными нулю, не следует соединять с точкой трехфазного КЗ, а следует объединять их в эквивалентные ветви с генераторами.

Данный подход относится к выполнению преобразований схем для расчета других повреждений, таких как обрыв проводов, одновременные повреждения в нескольких точках и т. д., причем если повреждения сопровождаются возникновением несимметрии трехфазной системы, то аналогичным преобразованиям подвергают схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Отметим, что при повреждении в двух точках элементарной схемой, к которой может быть приведена исходная схема, является либо треугольник, либо эквивалентная ему звезда.

Вопросы для самопроверки

1. Понятие математической модели электрической системы.
2. Каковы схемы замещения основных элементов ЭС — генераторов, трансформаторов, ЛЭП и т. д., — используемые для расчетов токов КЗ?

3. Каковы основные расчетные допущения и цели их применения?
4. Как осуществляется приведение параметров схем замещения к одной ступени напряжения: с точным и приближенным учетом коэффициентов трансформации?
5. Как выглядит схема замещения сдвоенного реактора?
6. Каковы принципы объединения параллельно работающих источников в один эквивалентный?
7. Как выполнить приведение схемы замещения ЭС к простейшему виду?
8. Как можно приближенно представить нагрузочные узлы?

1.4. Трехфазное КЗ в разветвленных сетях

При возникновении симметричных трехфазных КЗ $K^{(3)}$ в ЭС происходит изменение (увеличение) токов во всех ее ветвях (наибольшее увеличение тока наблюдается в ветвях, расположенных вблизи повреждения). Напряжения в узлах ЭС снижаются (в точке КЗ напряжение равно нулю). Увеличение тока объясняется прежде всего изменением электрического состояния ЭС (уменьшением сопротивления). Кроме того, как показал анализ режимов КЗ в простейших цепях (подгл. 1.1), в полном токе наряду с периодической (вынужденная) составляющей появляется апериодическая (свободная) составляющая, которая не только увеличивает мгновенное значение тока, но и искажает его форму.

Таким образом, полный ток КЗ для простейшей системы, питаемой от мощного источника, определяется так же, как по формуле (1.4):

$$i_k(t) = i_{\text{пк}}(t) + i_{\text{ак}}(t),$$

где $i_{\text{пк}}(t)$, $i_{\text{ак}}(t)$ — соответственно периодическая и апериодическая составляющие полного тока КЗ $i_k(t)$.

Электрическая система произвольной сложности, содержащая только мощные источники, последовательными преобразованиями всегда может быть представлена в виде простейшей схемы замещения с эквивалентным источником, передающими элементами и эквивалентным потребителем. Для такой системы расчет тока трехфазно-

го КЗ ничем не отличается от расчета, приведенного в подгл. 1.1 данного пособия.

Периодическая составляющая тока КЗ имеет неизменные амплитуду и фазу; апериодическая составляющая затухает до нуля с постоянной времени $\tau_{аз}$.

$$i_{ак}(t) = i_{ак}(0)e^{-t/\tau_{аз}}.$$

Пусть простейшая схема замещения (рис. 1.9) была получена путем преобразования разветвленной электрической сети, содержащей две параллельные ветви, (рис. 1.11). Без учета электромагнитного влияния цепей ток $i_k(t)$ в точке замыкания определяется по методу наложения:

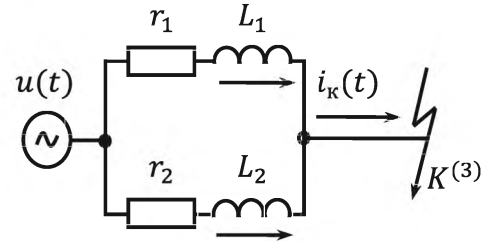


Рис. 1.11. Схема простейшей разветвленной цепи

$$i_k(t) = i_{1к}(t) + i_{2к}(t) = i_{1пк}(t) + i_{2пк}(t) + i_{1ак}(t) + i_{2ак}(t),$$

где $i_{1пк}(t)$, $i_{2пк}(t)$ — периодические составляющие тока КЗ первой и второй ветвей; $i_{1ак}(t)$, $i_{2ак}(t)$ — апериодические составляющие тока тех же ветвей.

Периодические составляющие тока КЗ рассчитываются по выражению

$$i_{\ell пк}(t) = \frac{U_m}{Z_{\ell}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\ell к}); \quad \ell = 1, 2,$$

где Z_{ℓ} — модуль сопротивления ветви, $Z_1 = \sqrt{r_1^2 + L_1^2}$, $Z_2 = \sqrt{r_2^2 + L_2^2}$; $\varphi_{\ell к}$ — аргументы этих сопротивлений, $\varphi_{1к} = \arctg(\omega L_1/r_1)$, $\varphi_{2к} = \arctg(\omega L_2/r_2)$. Сумма периодических составляющих заменяется одной эквивалентной составляющей $i_{пк}(t)$:

$$i_{пк}(t) = i_{1 пк}(t) + i_{2 пк}(t) = \frac{U_m}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k), \quad (1.10)$$

где Z_k — модуль эквивалентного сопротивления, $Z_k = Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)$; $\varphi_k = \arctg Z_k$.

Апериодические составляющие тока КЗ также можно заменить одной величиной $i_{ак}(t)$ с эквивалентной постоянной времени $\tau_{аз}$:

$$i_{\text{ак}}(t) = i_{1\text{ ак}}(t) + i_{2\text{ ак}}(t) = \\ = i_{1\text{ ак}}(0)e^{-\frac{t}{\tau_{a1}}} + i_{2\text{ ак}}(0)e^{-\frac{t}{\tau_{a2}}} = i_{\text{ак}}(0)e^{-\frac{t}{\tau_{aэ}}}, \quad (1.11)$$

где $i_{1\text{ ак}}(0)$, $i_{2\text{ ак}}(0)$, $i_{\text{ак}}(0)$ — начальные значения соответствующих составляющих, определяются по начальным условиям; τ_{a1} , τ_{a2} — постоянные времени затухания апериодических составляющих тока КЗ первой и второй ветвей, $\tau_{a1} = L_1/r_1$, $\tau_{a2} = L_2/r_2$; $\tau_{aэ}$ — эквивалентная постоянная времени, $\tau_{aэ} = \omega^{-1}(x_{\text{к}(r=0)}/r_{\text{к}(x=0)})$. Здесь $x_{\text{к}(r=0)}$ — результирующее реактивное сопротивление цепи относительно точки КЗ, полученное в предположении равенства нулю всех активных составляющих сопротивлений; $r_{\text{к}(x=0)}$ — результирующее относительно точки замыкания активное сопротивление цепи, рассчитанное при нулевых реактивных сопротивлениях.

Следует отметить, что выполняемая замена двух апериодических составляющих тока КЗ одной $i_{\text{ак}}(t)$ дает приближенное значение, поскольку не учитывается неодновременность затухания этих составляющих. Строгое решение определения $i_{\text{ак}}(t)$ может быть найдено операторным методом. Если число ветвей произвольно, то вычисление периодической составляющей тока КЗ $i_{\text{пк}}(t)$ выполняется аналогично выражению (1.9).

Апериодические составляющие предпочтительно находить для каждой ветви в отдельности, но можно заменить суммарной экспонентой, определенной из условия непрерывности тока в ветви при КЗ

Эквивалентная постоянная времени $\tau_{aэ}$ рассчитывается на основании значений отношения x_{Σ}/r_{Σ} для характерных точек КЗ, приведенных в источниках [1], [4]. Значения отношений x_{Σ}/r_{Σ} также представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Значения x_{Σ}/r_{Σ} и k_y в сложных электрических сетях

Место КЗ и характеристика электрической сети	Отношение x_{Σ}/r_{Σ}	Ударный коэффициент k_y
1. Сборные шины 6–10 кВ станций с генераторами мощностью 30–60 МВт	40–80	1,92–1,96
2. За линейным реактором до 1000 А, присоединенным к сборным шинам станции по п. 1	20–60	1,85–1,95

Место КЗ и характеристика электрической сети	Отношение x_{Σ}/r_{Σ}	Ударный коэффициент k_y
3. Сборные шины повышенного напряжения станций с трансформаторами мощностью 100 МВ·А (в единице) и выше	30–60	1,89–1,95
4. То же, с трансформаторами мощностью 30–100 МВ·А (в единице)	20–50	1,85–1,94
5. Сборные шины вторичного напряжения подстанций с трансформаторами мощностью 100 МВ·А (в единице и выше); сопротивление трансформаторов составляет 90 % и выше от результирующего сопротивления до места КЗ	20–40	1,85–1,92
6. То же, с трансформаторами мощностью 30–100 МВ·А (в единице)	15–30	1,81–1,89

1.5. Порядок расчета тока КЗ в аварийной ветви

Основное требование, которому должен удовлетворять практический метод анализа того или иного процесса, заключается в простоте его применения. Однако простота метода может быть несовместима с точностью расчета, поскольку чем проще метод, тем на большем числе допущений он основан.

В практических методах наиболее строго определяется действующее значение тока КЗ в начальный момент, т. е. сверхпереходный ток I''_k . Погрешность расчета составляет 5 %. Если рассчитать ток в произвольный момент времени, точность расчета существенно уменьшается и погрешность в аварийной ветви может достигать 10–15 %. Для остальных ветвей схемы ошибка вычислений оказывается обычно больше. Она растет по мере удаления от точки замыкания и увеличения времени переходного процесса.

В практических расчетах тока трехфазного КЗ в электрических системах с источниками конечной мощности используются все введенные ранее допущения и применяют дополнительные:

- закон изменения периодической составляющей тока $i_{пк}(t)$, установленный для изолированно работающей синхронной машины, распространяется на случай сложной ЭС с несколькими синхронными и другими электрическими машинами;

- апериодическая составляющая тока КЗ $i_{ак}(t)$ учитывается приближенно по формуле (1.11);
- роторы синхронных и асинхронных машин в ЭС считаются строго симметричными, их параметры по продольной и поперечной осям одинаковы, поэтому можно отказаться от рассмотрения переходного процесса отдельно по осям d и q .

С учетом представленных выше допущений, при расчете тока КЗ можно руководствоваться следующими положениями:

- изменение во времени ЭДС, напряжений и токов рассматривается без разложения на составляющие по осям d и q ;
- вследствие симметричности роторов СМ в токе КЗ будут отсутствовать составляющие двойной частоты.

Для сложнзамкнутых ЭС расчет тока трехфазного КЗ в аварийной ветви выполняется следующим образом:

1) формулируются основные расчетные допущения, дающие возможность пользоваться упрощенными представлениями о переходных процессах;

2) в соответствии с целевым назначением расчета определяются расчетные условия;

3) в зависимости от принятых допущений составляется схема замещения ЭС и определяются параметры ее элементов;

4) при необходимости исключаются трансформаторные связи между отдельными элементами, в частности, выполняется приведение параметров схемы замещения к одной ступени напряжения;

5) схема замещения последовательными преобразованиями приводится к простейшему виду — неразветвленной цепи;

6) определяется действующее значение периодической составляющей тока КЗ в начальный момент и значение эквивалентной постоянной времени апериодической составляющей тока, предполагается, что начальное значение апериодической составляющей в одной из фаз аварийной ветви максимально;

7) рассчитывается ударный ток КЗ в выделенной фазе аварийной ветви;

8) при необходимости находится распределение токов в схеме замещения ЭС;

9) определяется действующее значение полного тока в произвольный (заданный) момент времени.

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени для преобразованной схемы замещения ЭС (рис. 1.9) находится по выражению

$$I''_{п0} = \frac{E_{\Sigma}}{Z_{\Sigma}(x_{\Sigma})}. \quad (1.12)$$

Для удаленных КЗ от источников ЭДС сверхпереходный ток рассчитывается как

$$I''_{п0} = U_{к0}/x_{\Sigma},$$

где $U_{к0}$ — напряжение предшествующего режима в точке замыкания.

Ударный ток КЗ. При расчете ударного тока в сложной ЭС можно столкнуться с тремя характерными случаями.

КЗ в удаленной точке ЭС. Электрически удаленной считается точка, расположенная в устройствах и в сети повышенного напряжения электрических станций и подстанций, в распределительных устройствах низкого напряжения без синхронных компенсаторов, за линейными реакторами электростанций и подстанций. При КЗ в удаленной точке ударный ток определяется по выражению

$$i_{уд} = \sqrt{2}k_y I''_{п0},$$

где k_y — ударный коэффициент, $k_y = 1 + e^{-0,01/\tau_{аэ}}$. Здесь $\tau_{аэ}$ — постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, $\tau_{аэ} = \omega^{-1}(x_{\Sigma(r=0)}/r_{\Sigma(x=0)})$.

Согласно ГОСТ 52735–07 при отношениях $x_{\Sigma}/r_{\Sigma} < 5$ ударный коэффициент тока КЗ рекомендуется определять с учетом реального угла сдвига по фазе между периодической составляющей тока и напряжением по формуле (1.6). Для оценки величин x_{Σ} и r_{Σ} , определяемых для схем, при отсутствии значений активных или реактивных сопротивлений можно использовать данные, приведенные ниже, а также в табл. 1.5.

Значения отношений x/r для типовых элементов ЭС:

Типовые элементы ЭС	x/r , о. е.
1. Турбогенераторы мощностью до 100 МВт.....	50–85
2. Турбогенераторы мощностью 100–500 МВт.....	100–140
3. Гидрогенераторы с демпферными обмотками.....	40–60
4. Гидрогенераторы без демпферных обмоток.....	60–90
5. Трансформаторы мощностью 5–30 МВ·А.....	7–17
6. Трансформаторы мощностью 60–500 МВ·А.....	20–50
7. Реакторы 6–10 кВ до 1000 А.....	15–70
8. Реакторы 1500 А и выше.....	40–80
9. Воздушные линии.....	2–8
10. Трехжильные кабели 6–10 кВ с медными и алюминиевыми жилами сечением 3×95 – 3×185 мм ² ..	0,2–0,8
11. Обобщенная нагрузка.....	2,5

Здесь для каждого элемента ЭС приведено значение отношения x/r . В схему замещения, ранее составленную только для реактивных сопротивлений, для каждого элемента вводится соответствующее значение активного сопротивления r .

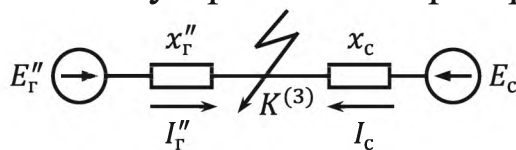
Таблица 1.5

Определение τ_a и k_y для различных точек КЗ

Место возникновения КЗ	τ_a , с	k_y
1. Турбогенераторы 100–1000 МВт	0,4–0,54	1,975–1,98
2. Блоки турбогенератор-трансформатор, МВт:		
100–200	0,26	1,965
300	0,32	1,977
500	0,35	1,983
800	0,30	1,967
3. Система, связанная воздушными линиями с шинами, где рассматривается КЗ, кВ:		
220–330	0,03–0,04	1,717–1,780
500–750	0,06–0,08	1,850–1,895

В табл. 1.5 представлены значения τ_a и k_y для характерных точек ЭС, в этом случае r_{Σ} вычисляется в предположении $x = 0$ и учитывается приближенно.

КЗ вблизи генератора (рис. 1.12). При возникновении КЗ на вводах генераторов или блоков генератор-трансформатор, на сборных шинах устройств генераторного напряжения электрическая система



рассматривается относительно точки замыкания как два (или несколько) эквивалентных источника:

Рис. 1.12. Расчетная схема для определения i_y при КЗ вблизи генератора

– генератор (или несколько генераторов), подключенный непосредственно к точке КЗ;

– оставшаяся часть — система.

Ударный ток в этом случае находится по выражению

$$i_y = \sqrt{2}(I''_Г k_{yГ} + I_c k_{yc}),$$

где $I''_Г$, I_c — начальные значения периодических составляющих тока КЗ генератора и системы соответственно; $k_{yГ}$, k_{yc} — ударные коэффициенты для генератора и системы. Значение ударного коэффициента $k_{yГ}$ определяется с учетом затухания апериодической составляющей тока генератора $\tau_{aГ}$ (см. данные на с. 33–34 и табл. 1.5), $k_{yc} = 1 + e^{-0,01/\tau_{ac}}$.

КЗ вблизи узлов двигательной нагрузки. К подобному типу КЗ относятся замыкания в распределительных устройствах собственных нужд электрических станций, в распределительных устройствах с напряжением 6–20 кВ с крупными двигателями. В этом случае для расчета i_y в схеме замещения ЭС выделяется ветвь, содержащая двигатель (или группу двигателей), подключенный непосредственно к точке КЗ (рис. 1.13).

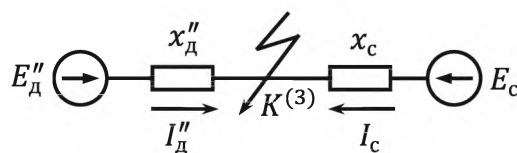


Рис. 1.13. Расчетная схема для определения i_y при КЗ вблизи двигателя

Ударный ток КЗ вычисляется по выражению

$$i_y = \sqrt{2}(I''_д k_{yд} + I_c k_{yc}), \quad (1.13)$$

где $I''_д$ — действующее значение периодической составляющей тока КЗ от двигателя в начальный момент времени, $I''_д = E''_д / x''_д$.

При определении $k_{yд}$ надо иметь в виду, что в двигателях периодическая и апериодическая составляющие тока затухают практиче-

ски одновременно, поэтому учитывается затухание обеих составляющих. Значение $k_{уд}$ существенно зависит от величины активной мощности двигателя (рис. 1.14). Обычно принимают среднее значение $k_{уд}$, соответствующее средней кривой, приведенной на рис. 1.14. В соответствии с ГОСТ 52735–07 приблизительно для ветвей с асинхронными двигателями рекомендуется принимать $k_{уд} = 1,6$. Для обобщенной нагрузки $k_{у он} = 1 \div 1,3$.

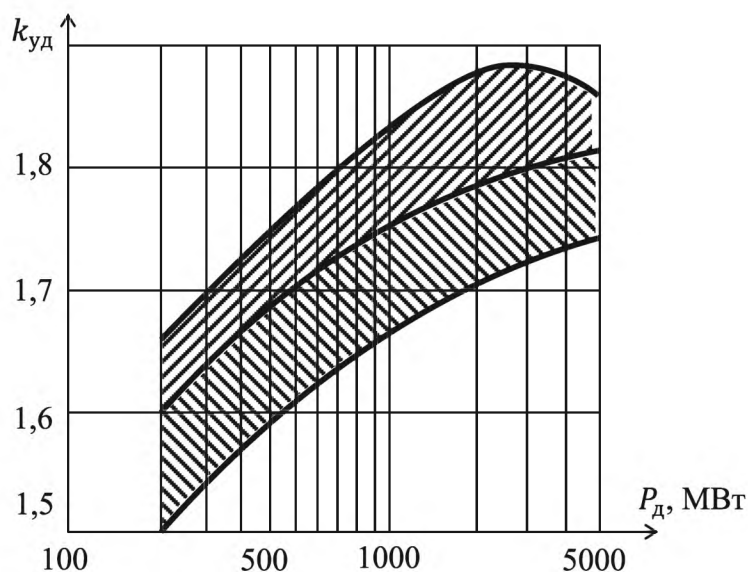


Рис. 1.14. Значения ударного коэффициента для асинхронного двигателя

Вопросы для самопроверки

1. Какие составляющие присутствуют в полном токе КЗ?
2. Каким образом определяется периодическая составляющая тока в точке КЗ в сложной ЭС?
3. Как выполняется приближенный расчет апериодической составляющей тока КЗ?
4. Как определяется эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ в сложной ЭС?
5. Каков порядок расчета тока КЗ в аварийной ветви?
6. Что такое расчетные условия?
7. Как рассчитать ударный ток КЗ?

1.6. Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ от синхронных и асинхронных машин в произвольный момент времени

В предыдущих подглавах был представлен порядок расчета трехфазного КЗ для электрической цепи, присоединенной к источнику синусоидального напряжения, амплитуда которого неизменна, т. е. к так называемому источнику бесконечной мощности. На практике таким источником можно считать эквивалентированную к E_c и x_c соседнюю энергосистему или удаленные от точки КЗ электростанции. По мере приближения КЗ к генераторам данное допущение становится неприемлемым.

В приближенных расчетах радиальной схемы для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ от турбогенераторов и от синхронных компенсаторов в произвольный момент времени следует применять метод типовых кривых. Он основан на использовании кривых изменения во времени отношения действующих значений этой составляющей в произвольный момент времени I_{pt} к соответствующей составляющей в начальный момент КЗ $I_{п0}$, т. е. $\gamma_t = I_{pt}/I_{п0}$ при разных удаленностях точки КЗ (рис. 1.15, 1.16).

Расчетные кривые используются при определении периодической составляющей тока КЗ для различных групп турбогенераторов с учетом оснащения генераторов разных типов определенными системами возбуждения. На рис. 1.15, а представлены типовые кривые для турбогенераторов с тиристорной независимой системой возбуждения: ТВВ-300-2ЕУЗ, ТВВ-500-2ЕУЗ, ТВВ-800-2ЕУЗ, ТГВ-300-2УЗ, ТГВ-800-2УЗ. Турбогенераторы с тиристорной системой параллельного самовозбуждения (рис. 1.15, б) — ТВФ-100-2УЗ, ТВФ-100-2ЕУЗ, ТВФ-120-2УЗ, ТВВ-160-2ЕУЗ, ТВВ-167-2УЗ, ТВВ-200-2АУЗ, ТВВ-220-2УЗ, ТВВ-220-2ЕУЗ, ТГВ-200-2УЗ, ТЗВ-220-2ЕУЗ, ТЗВ-320-2ЕУЗ. Диодная независимая (высокочастотная) система возбуждения (рис. 1.16, а) характерна для турбогенераторов типа ТВФ-63-2ЕУЗ, ТВФ-63-2УЗ, ТВФ-110-2ЕУЗ, а диодная бесщеточная (рис. 1.16, б) — для турбогенераторов типа ТВВ-1000-2УЗ и ТВВ-1200-2УЗ.

Все кривые получены с учетом насыщения стали статора, насыщения путей рассеяния статора, вызванного апериодической составляющей статорного тока, эффекта вытеснения токов в контурах ротора и регулирования частоты вращения ротора турбины. При этом предполагается, что до КЗ генератор работал в номинальном режиме.

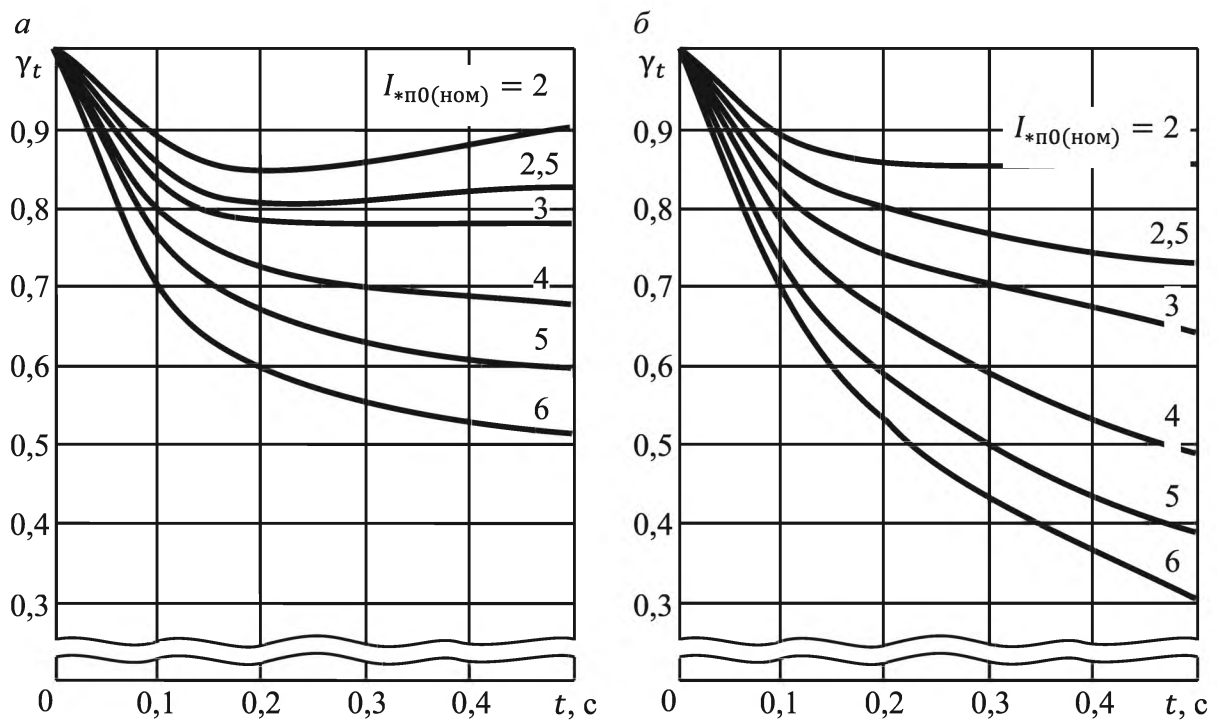


Рис. 1.15. Типовые кривые изменения относительного значения периодической составляющей тока КЗ от турбогенераторов:
a — с тиристорной независимой системой возбуждения;
б — с тиристорной системой самовозбуждения

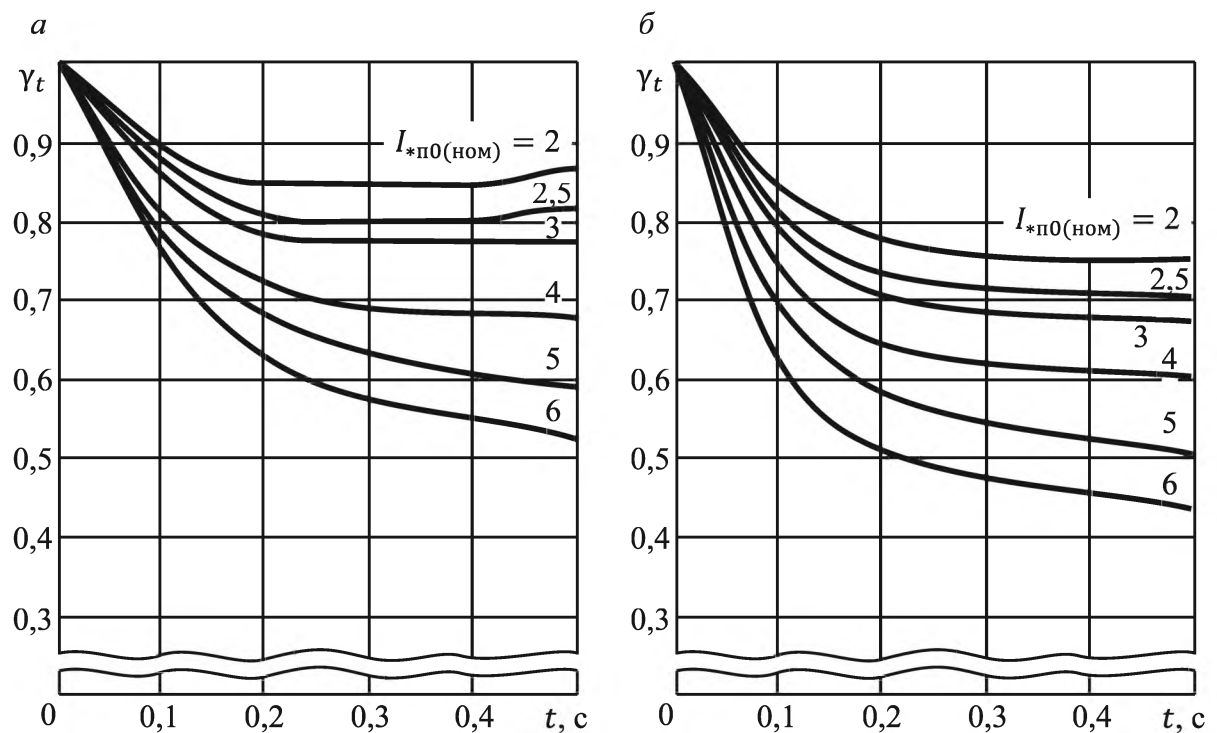


Рис. 1.16. Типовые кривые изменения относительного значения периодической составляющей тока КЗ от турбогенераторов:
a — с диодной независимой (высокочастотной) системой возбуждения;
б — с диодной бесщеточной системой возбуждения

Удаленность точки КЗ от синхронной машины характеризуется отношением действующего значения периодической составляющей тока этой машины в начальный момент КЗ к номинальному току машины:

$$I_{*п0(ном)} = I_{п0}/I_{ном}, \quad (1.14)$$

где $I_{п0}$ — начальное действующее значение периодической составляющей тока машины при КЗ, приведенное либо к номинальному напряжению синхронной машины, либо к ступени напряжения, где произошло КЗ, кА; $I_{ном}$ — номинальный ток синхронной машины (на той же ступени напряжения).

В тех случаях, когда расчетная точка КЗ отделена от синхронной машины трансформаторами, для определения значения $I_{*п0(ном)}$ допустимо использовать формулу

$$I_{*п0(ном)} = I_{п0} \frac{U_{кз}}{I_{ном} U_{ном}},$$

где $U_{кз}$ — напряжение ступени, для которой рассчитан ток $I_{п0}$.

В зависимости от исполнения системы возбуждения генераторных агрегатов выбираются соответствующие кривые. Все кривые построены для синхронных генераторов (компенсаторов), у которых кратность предельного напряжения возбуждения по отношению к номинальному напряжению возбуждения не превышает двух. Для гидрогенераторов, имеющих повышенные кратности предельного напряжения возбуждения по отношению к номинальному напряжению возбуждения (больше двух), кривые рис. 1.15 допускается использовать только при небольшой удаленности точки КЗ, когда $I_{*п0(ном)} > 3$. При большей удаленности точки КЗ периодическую составляющую следует принимать неизменной по амплитуде.

Если отношение действующего значения периодической составляющей тока синхронной машины в начальный момент КЗ к ее номинальному току менее двух ($I_{*п0(ном)} < 2$), то замыкание следует считать удаленным и периодическую составляющую принимать неизменной по амплитуде.

Расчет действующего значения периодической составляющей от синхронного генератора (компенсатора) или нескольких однотипных

синхронных генераторов (компенсаторов), находящихся в одинаковых условиях по отношению к точке КЗ, следует вести так:

- составить схему замещения для определения начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины (или группы машин) и найти относительный ток $I_{*п0(ном)}$ (для группы машин в расчетную формулу для определения $I_{*п0(ном)}$ необходимо вместо $I_{ном}$ подставить соответственно сумму номинальных токов машин);
- исходя из системы возбуждения синхронной машины (группы машин) выбрать типовые кривые (рис. 1.15, 1.16) и по кривой $\gamma_t = f(t)$, соответствующей найденному значению $I_{*п0(ном)}$, для заданного момента времени t_p найти отношение токов γ_{t_p} ;
- определить искомое действующее значение периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины (или группы машин) в момент времени t_p :

$$I_{пт_p} = \gamma_{t_p} I_{п0},$$

где $I_{п0}$ — начальное значение периодической составляющей тока ступени напряжения ЭС, на которой находится точка КЗ.

Следует обратить внимание на тот факт, что в результате эквивалентирования может быть получено два вида схемы замещения ЭС (рис. 1.17).

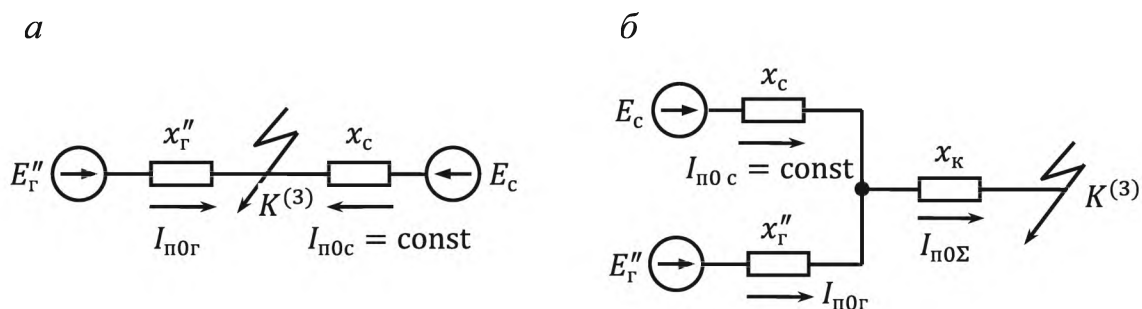


Рис. 1.17. Варианты схемы замещения ЭС:
радиальная (а), трехлучевая звезда (б)

Для радиальной схемы замещения ЭС (рис. 1.17, а) действующее значение периодической составляющей полного тока КЗ в заданный момент времени $I_{пт_p}$ в точке КЗ находится как сумма двух слагаемых:

$$I_{пт_p} = I_{пт_p} + I_{п0c} = \gamma_{t_p} I''_{п0r} + I_{п0c}. \quad (1.15)$$

Схема, представленная в виде трехлучевой звезды (рис. 1.17, б), рассматривается аналогично радиальной. Для каждого генератора находится $I_{*п0(ном)}$ и по основным кривым определяется значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени. В месте замыкания действующее значение периодической составляющей суммарного тока определяется по выражению (1.15) как сумма действующих значений периодических составляющих токов КЗ от генератора (изменяющейся) и от системы (неизменной во времени).

В приближенных расчетах для определения действующего значения периодической составляющей в произвольный момент времени от асинхронных электродвигателей для радиальной схемы следует использовать типовые кривые, приведенные на рис. 1.18, от синхронных электродвигателей (для радиальной сети) – приведенные на рис. 1.19.

Величина $\gamma_{tАД}$ представляет отношение действующего значения периодической составляющей тока КЗ в разные моменты времени к действующему значению этой же составляющей при $t = 0$.

Для асинхронных двигателей

$$\gamma_{tАД} = I_{пт(АД)} / I_{п0(АД)}.$$

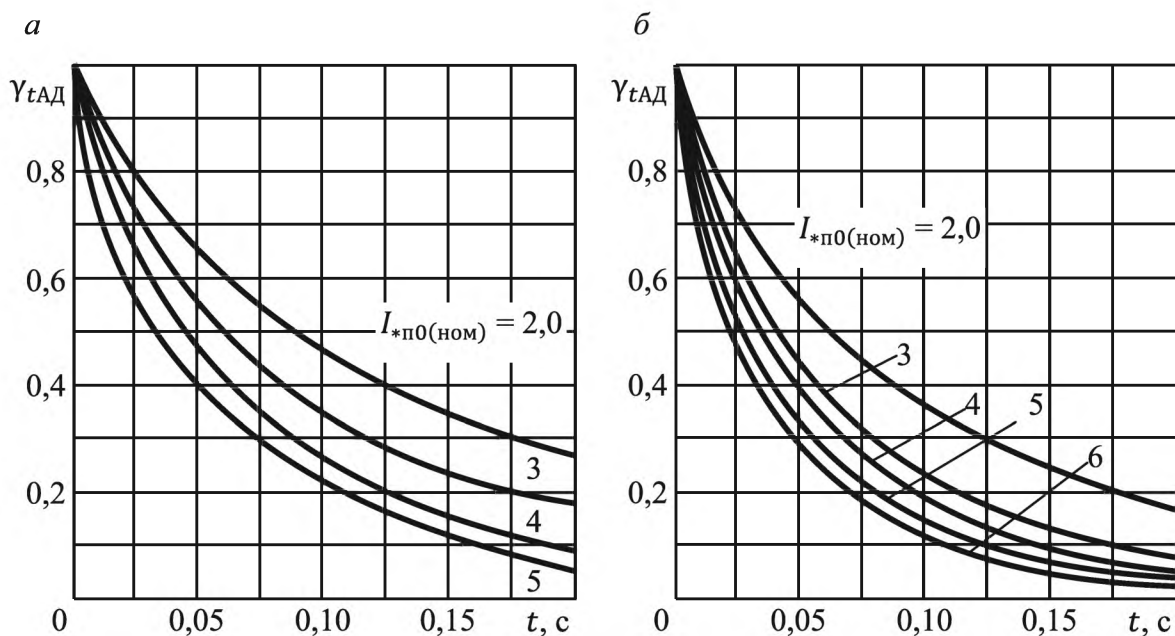


Рис. 1.18. Типовые кривые изменения относительного значения периодической составляющей тока КЗ от асинхронных электродвигателей:

а — напряжением выше 1 кВ; б — ниже 1 кВ

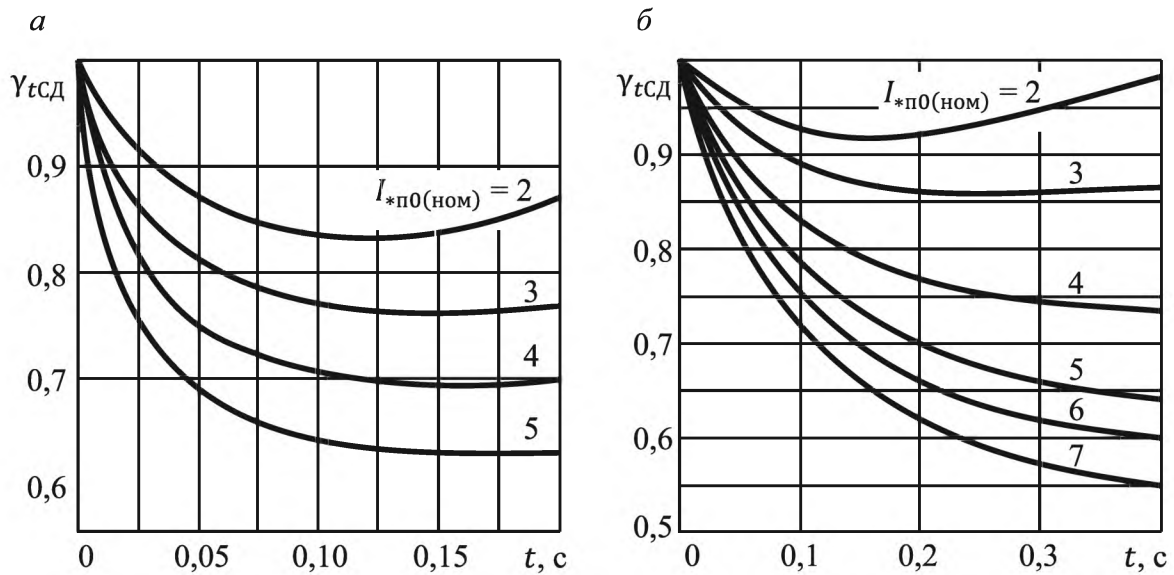


Рис. 1.19. Типовые кривые изменения относительного значения периодической составляющей тока КЗ от синхронных электродвигателей:
a — напряжением выше 1 кВ; *б* — ниже 1 кВ

Для синхронных двигателей

$$\gamma_{тсД} = I_{пт(сД)} / I_{п0(сД)}.$$

Удаленность точки КЗ от того или иного электродвигателя характеризуется отношением действующего значения периодической составляющей тока электродвигателя в начальный момент КЗ к его номинальному току, т. е.

$$I_{*п0(АД)ном} = I_{п0(АД)} / I_{ном(АД)},$$

$$I_{*п0(сД)ном} = I_{п0(сД)} / I_{ном(сД)}.$$

Порядок расчета действующего значения периодической составляющей от асинхронного или синхронного электродвигателя в произвольный момент времени аналогичен расчету действующего значения периодической составляющей тока КЗ от синхронного генератора (компенсатора), находящегося в таких же условиях по отношению к точке замыкания. Значение периодической составляющей тока в момент времени t_p , кА,

$$I_{пт_p(АД)} = \gamma_{т_pАД} I_{*п0(АД)ном} I_{ном(АД)},$$

$$I_{пт_p(сД)} = \gamma_{т_pсД} I_{*п0(сД)ном} I_{ном(сД)}. \quad (1.16)$$

Поведение различных типов электроприемников при нормальных и аварийных режимах в ЭС значительно отличается. При коротком замыкании электродвигатели подпитывают током КЗ место повреждения. Если узел нагрузки в основном состоит из асинхронных двигателей, такая подпитка проявляется только в первые несколько периодов переходного процесса. Это объясняется тем, что постоянные времени затухания амплитуды периодической и апериодической составляющих тока имеют одинаковый порядок, т. е. затухание амплитуды периодической составляющей происходит столь же быстро, как и апериодической составляющей. В том же случае, когда в состав нагрузки входят синхронные двигатели, именно ими определяются характер затухания тока КЗ и его значение.

Для обобщенной нагрузки принимается, что $I_{пт} = 0$ для любых моментов времени, отличных от нуля, т. е. обобщенная нагрузка участвует в подпитке точки КЗ только в начальный момент замыкания, в ударном токе и далее не учитывается.

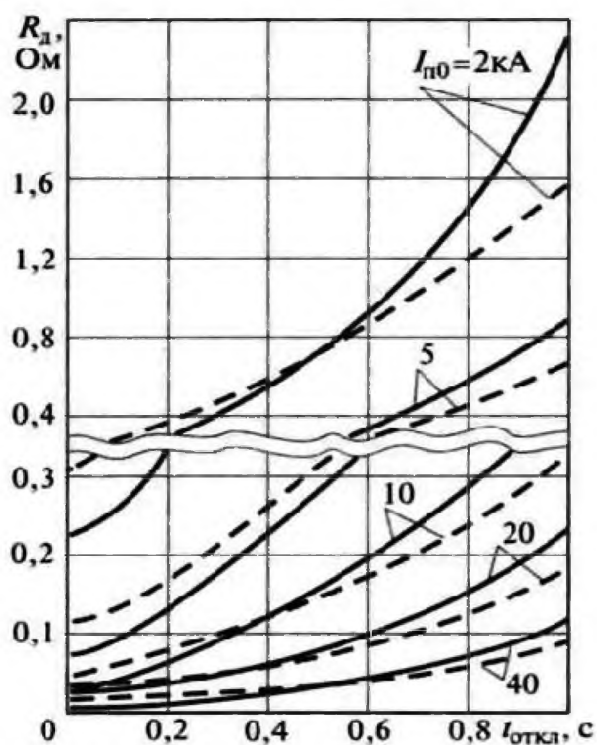
1.7. Учет изменения параметров электрической цепи при расчете токов КЗ

Значение тока КЗ в произвольный момент времени зависит не только от электрической удаленности точки замыкания от источников, но и от изменения параметров электрической цепи, которое заключается в увеличении активного сопротивления проводников (кабели) вследствие их нагрева током (эффект теплового спада тока КЗ), изменении индуктивных сопротивлений воздушных линий вследствие смещений фазных проводов, вызванных электродинамическим действием токов КЗ (особенно для сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей при несимметричных режимах). Кроме того, для определения минимального значения тока КЗ в заданный момент времени рекомендуется учитывать сопротивление электрической дуги.

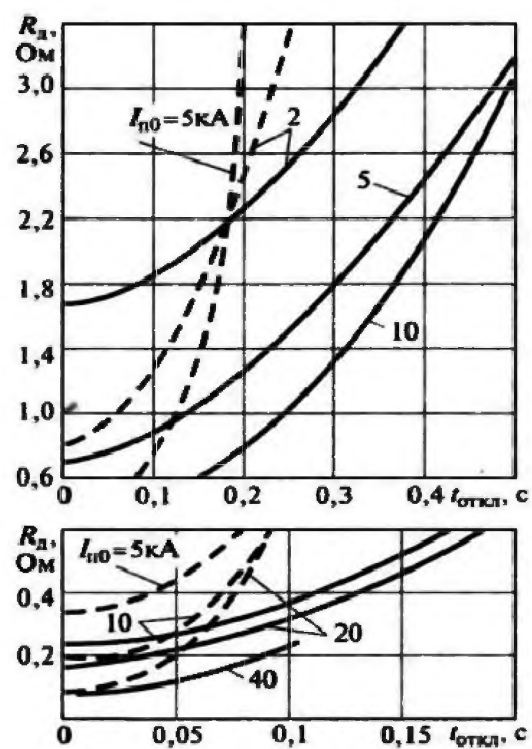
При замыкании, сопровождающемся горением дуги, учет электрической дуги в месте замыкания выполняют путем добавления в схему замещения активного сопротивления дуги R_d . Величину этого сопротивления в начальный и произвольный момент времени можно определить по кривым рис. 1.20.

Когда активное сопротивление проводника к моменту замыкания составляет не менее 20 % от суммарного индуктивного сопротивления цепи КЗ, тогда эффект теплового спада тока в некотором проводнике учитывают.

a



б



в

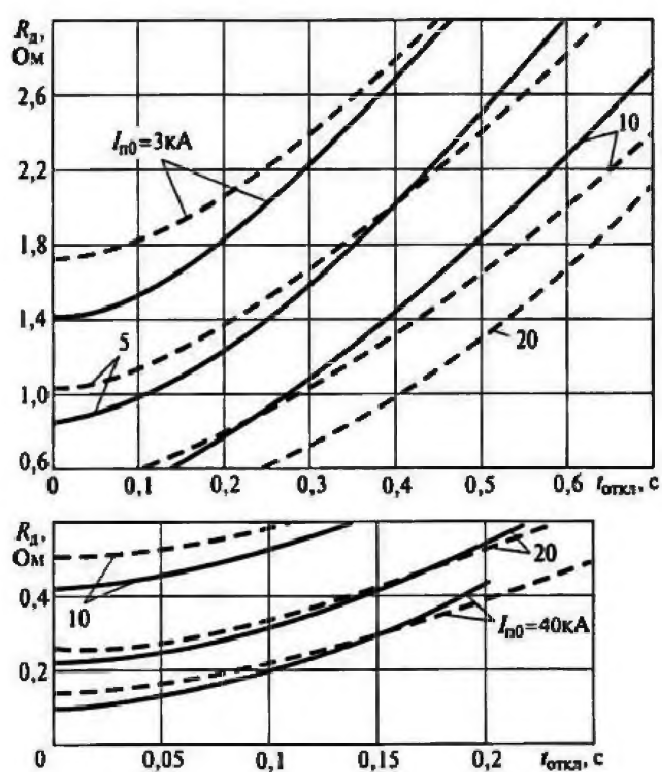


Рис. 1.20. Типовые кривые для определения $R_d = f(t_{откл}, I_{п0})$ при КЗ в сети:

- a* – с кабельными линиями 6 кВ (—) и 10 кВ (- -);
- б* – с воздушными линиями 35 кВ (—) и 10 кВ (- -);
- в* – то же, 110 кВ (—) и 220 кВ (- -)

Активное сопротивление проводника при его начальной температуре $\theta_{\text{нач}}$ отличается от справочного значения, которое обычно определяется при нормированной температуре $\theta_{\text{норм}} = 20^\circ$ и рассчитывается по формуле

$$R_{\text{нач}} = R_{0(\theta_{\text{норм}})} \ell \frac{\theta_{\text{ус}} + \theta_{\text{нач}}}{\theta_{\text{ус}} + \theta_{\text{норм}}}, \quad (1.17)$$

где $R_{0(\theta_{\text{норм}})}$ — удельное активное сопротивление проводника, Ом/м, при нормированной температуре $\theta_{\text{норм}}$; ℓ — длина проводника до места замыкания, м; $\theta_{\text{ус}}$ — условная температура (для меди 234°C , для алюминия 236°C).

Температура проводника до замыкания рассчитывается по формуле

$$\theta_{\text{нач}} = (I_{\text{норм.расч}}/I_{\text{доп.расч}})^2 (\theta_{\text{доп.прод}} - \theta_{\text{окр.норм}}) + \theta_{\text{окр}}, \quad (1.18)$$

где $I_{\text{норм.расч}}$ — расчетный ток нормального режима, А; $I_{\text{доп.расч}}$ — допустимый ток продолжительного режима для проводника данного сечения, А; $\theta_{\text{доп.прод}}$ — допустимая температура нагрева проводника в продолжительном режиме, $^\circ\text{C}$; $\theta_{\text{окр.норм}}$ — нормированная температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$; $\theta_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$.

Активное сопротивление проводника в режиме КЗ увеличивается на коэффициент K_θ

$$R_{\theta t} = K_\theta R_{\text{нач}}, \quad (1.19)$$

величина которого зависит от материала проводника, конечной температуры $\theta_{\text{кон}}$ и определяется по формуле

$$K_\theta = \frac{\theta_{\text{ус}} + \theta_{\text{кон}}}{\theta_{\text{ус}} + \theta_{\text{нач}}}. \quad (1.20)$$

Температура проводника к заданному моменту времени зависит от тока, протекающего по нему, и от величины теплоотдачи в изоляцию, если этот проводник (кабель) изолированный. Учитывать тепло-

отдачу необходимо в том случае, когда время отключения КЗ $t_{\text{откл}}$ (время нагрева проводника) превышает критическое время отключения $t_{\text{откл.кр}}$, в противном случае погрешность при определении температуры превысит 5 %. Другими словами, теплопередачу следует учитывать, если $t_{\text{откл}} > t_{\text{откл.кр}}$. Критическая продолжительность КЗ зависит от площади поперечного сечения проводника S и рассчитывается для кабельных линий (КЛ):

- с алюминиевыми жилами $t_{\text{откл.кр}} = 0,65 \cdot 10^{-2} S$; (1.21)
- медными жилами $t_{\text{откл.кр}} = 1,22 \cdot 10^{-2} S$.

Конечная температура проводника (с учетом теплоотдачи в изоляцию) при металлическом коротком замыкании определяется по формуле

$$\theta_{\text{кон}} = (\theta_{\text{нач}} + \beta) e^{\frac{I_{\text{пт}}^2 t_{\text{отк}}}{K_1^2 S^2 \varepsilon^2}} - \beta, \quad (1.22)$$

где $I_{\text{пт}}$ — ток металлического КЗ в момент его отключения, А; K_1 — постоянная, зависящая от материала проводника, $\text{А} \cdot \text{с}^{0,5} / \text{мм}^2$; S — площадь поперечного сечения проводника, мм^2 ; ε — коэффициент, учитывающий отвод тепла в изоляцию; β — величина, обратная температурному коэффициенту сопротивления, $^{\circ}\text{С}$. Значения используемых постоянных и коэффициентов приведены в табл. 1.6.

$$\varepsilon = \sqrt{1 + FA \sqrt{\frac{t_{\text{отк}}}{S}} + F^2 B \frac{t_{\text{отк}}}{S}}, \quad (1.22)$$

где F — коэффициент, учитывающий неполный тепловой контакт между проводником и изоляцией, обычно принимается равным 0,7; A и B — эмпирические постоянные, определяющие термические характеристики окружающих или соседних неметаллических материалов, $\text{мм}^2 / \text{с}^{0,5}$ и $\text{мм}^2 / \text{с}$ соответственно. Значения этих постоянных для различных характеристик КЛ приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Значения коэффициентов
для определения температуры проводника

Параметр		Материал проводника	
		Медь	Алюминий
Условная температура $\theta_{ус}$, °C		234	236
Постоянная K_1 , А·с ^{0,5} /мм ²		226	148
Величина, обратная температурному коэффициенту сопротивления, β , °C		234,5	228
A , мм ² /с ^{0,5}	Изоляция бумажная пропитанная	0,412	0,569
	Изоляция ПВХ, $U \leq 3$ кВ	0,417	0,575
	Изоляция ПВХ, $U > 3$ кВ	0,380	0,525
B , мм ² /с	Изоляция бумажная пропитанная	0,118	0,163
	Изоляция ПВХ, $U \leq 3$ кВ	0,120	0,166
	Изоляция ПВХ, $U > 3$ кВ	0,100	0,139

Конечная температура проводника, если КЗ дуговое и $t_{отк} < 0,5$ с, рассчитывается по формуле (1.22), при этом входящее в выражение значение тока в момент отключения $I_{пт}$ надо определять с учетом сопротивления дуги:

$$I_{пт} = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3} \sqrt{(R_{каб} + R_д)^2 + X_{\Sigma}^2}}.$$

Кроме того, конечную температуру нагрева проводника при КЗ без учета теплоотдачи в изоляцию можно рассчитывать по формуле (1.22), принимая ϵ равным 1.

При учете изменения активного сопротивления кабелей действующее значение периодической составляющей тока КЗ $I_{пт}$ определяется как

$$I_{пт} = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3} \sqrt{(K_{\theta} R_{каб} + R_д)^2 + X_{\Sigma}^2}}.$$

Расчет коэффициента увеличения активного сопротивления кабелей K_θ при дуговых КЗ и $t_{отк} > 0,5$ с следует выполнять с учетом взаимного влияния изменения активного сопротивления кабеля и активного сопротивления электрической дуги.

Вопросы для самопроверки

1. Как изменяется ток КЗ в сложных ЭС, имеющих источники различной мощности?
2. Какими схемами замещения представляются машинные элементы ЭС в начальный момент КЗ?
3. Расчет начального значения периодической составляющей тока КЗ.
4. Основные случаи определения ударного тока.
5. Расчетные кривые. Порядок их использования для расчета изменения во времени периодической составляющей тока КЗ.
6. Каково влияние параметров режима на параметры элементов ЭС?
7. Явление теплового спада тока КЗ.

Расчетные примеры к главе 1

Пример 1

Электрическая цепь была запитана от мощного источника и до КЗ не нагружена (на холостом ходу). При трехфазном КЗ установлено, что амплитудное значение установившегося тока в фазе C $I_{mk} = 13,1$ кА, максимальное значение полного тока $i_k^{\max} = 16,9$ кА. Первое максимальное (амплитудное) значение $u(t)$ в фазе C наступило через $1/8$ периода. Установившийся ток $i_k(t)$ в фазе C отстает от $u(t)$ на $0,00416$ с.

Найти характеристики поведения тока КЗ в остальных фазах электрической сети.

Решение. Известно, что $\omega = 2\pi f$, $f = 1/T$, тогда $T = 2\pi/\omega = 3,14 \cdot 2/314 = 0,02$ с. По условию время достижения максимума напряжения в фазе C составляет $t_{амп} = T/8 = 0,0025$ с (или $2\pi/8 = \pi/4$). Воспользуемся этим для нахождения начальной фазы α_A . Так как $u_C(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha_C)$, то в момент $t_{амп}$ напряжение $u_C(t_{амп}) = U_m$ и $\sin(314t_{амп} + \alpha_C) = \pm 1$, отсюда $\alpha_C = \pi/4$ рад.

Начальные значения углов в фазах A и B определим с учетом взаимосвязи фаз (рис. 1.23)

$$\alpha_A = \frac{\pi}{4} - \frac{2\pi}{3} = -\frac{5\pi}{12} \quad \text{и} \quad \alpha_B = \frac{\pi}{4} + \frac{2\pi}{3} = \frac{11\pi}{12}.$$

Далее определим угол сдвига между током и напряжением. Если $i_{C\text{ ПК}}(t) = I_{m\text{ К}} \sin(\omega t + \alpha_C - \varphi_K)$ и задано, что ток отстает от напряжения на $0,004\ 16$ с, то максимум тока $i_{C\text{ max}} \approx I_{m\text{ К}}$ будет достигнут в момент времени максимума периодической составляющей $t_{C\text{ max}} = t_{\text{амп}} + 0,004\ 16 = 0,006\ 66$ с и $\omega t_{C\text{ max}} + \alpha_C - \varphi_K = \pi/2$, отсюда получим $\varphi_K = 5\pi/12$. Определим постоянную $\tau_a = L_K/r_K = = \omega^{-1} \operatorname{tg} \varphi_K = 314^{-1} \operatorname{tg}(5\pi/12) \approx 0,012$ с. Известно, что время протекания переходного процесса обычно составляет $(3\text{—}5)\tau_a$, т. е. в рассматриваемых условиях $0,036\text{—}0,06$ с.

Выражение для периодической составляющей тока КЗ в фазе C следующее:

$$\begin{aligned} i_{C\text{ ПК}}(t) &= I_{m\text{ К}} \sin(\omega t + \alpha_C - \varphi_K) = \\ &= 13,1 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4} - \frac{5\pi}{12}\right) = 13,1 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right). \end{aligned}$$

Следовательно, в начальный момент времени $t = 0$ $i_{C\text{ ПК}}(0) = = 13,1 \sin(-\pi/6) = -6,55$ кА. Если считать, что до момента КЗ сеть была не нагружена, режим был близок к холостому ходу, то в начальный момент времени мгновенное значение периодической составляющей равно апериодической составляющей с обратным знаком, или $i_{C\text{ ПК}}(0) + i_{C\text{ АК}}(0) = 0$ и $i_{C\text{ а0}} = 6,55$ кА. Апериодическая составляющая в произвольный момент времени находится как $i_{C\text{ АК}}(t) = 6,55 e^{-t/0,012}$. Выражение для тока КЗ в фазе C

$$i_{C\text{ К}}(t) = 13,1 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) + 6,55 e^{-t/0,012} \text{ кА.}$$

Выполнив аналогичные расчеты для определения токов в фазе C , получим выражения для нахождения тока КЗ в остальных фазах электрической цепи

$$i_{A\text{ К}}(t) = 13,1 \sin\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right) + 6,55 e^{-t/0,012},$$

$$i_{Bк}(t) = 13,1 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - 13,1e^{-t/0,012}.$$

Определение ударного тока для фазы С. Приближенное значение ударного тока определяется без учета начальной фазы φ_k :

$$i_{уд} = k_{уд} I_{mк} = 1,4345 \cdot 13,1 = 18,79 \text{ кА},$$

где $k_{уд} = 1 + e^{-0,01/0,012} = 1,4345$ (примем $x_k/r_k \geq 5$).

Точное значение максимума тока для фазы С определяется для момента времени $t = 0,00666 \text{ с}$

$$\begin{aligned} i_{уд} &= i_{Cк}(t_{C \max}) = \\ &= 13,1 \sin\left(314 \cdot 0,00666 - \frac{\pi}{6}\right) + 6,55e^{-\frac{0,00666}{0,012}} = 16,86 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Пример 2

Для участка ЭС заданы следующие параметры: $R = 2 \text{ Ом}$, $X = 28 \text{ Ом}$, $U = 215 \text{ кВ}$. Определить значение максимального тока КЗ во всех фазах электрической цепи и его время наступления, если начальное значение угла в фазе А равно 20° .

Решение. $Z_k = R + jX = 2 + j \cdot 28 \text{ Ом}$, тогда $|Z_k| = 28,071 \text{ Ом}$,

$\varphi_k = \arctg(X/R) = \arctg(28/2) = 1,499 \text{ рад}$, или $85,914^\circ$.

Постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ

$$\tau_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{28}{314 \cdot 2} = 0,045 \text{ с}.$$

Амплитудное значение периодической составляющей тока КЗ

$$I_m = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}|Z|} = \frac{215 \cdot \sqrt{2}}{28,071 \cdot \sqrt{3}} = 6,254 \text{ кА}.$$

Значение периодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени $t = 0$ в фазе А равно

$$\begin{aligned} i_{Aпк}(t = 0) &= I_m \sin(\omega \cdot 0 + \alpha_A - \varphi_k) = \\ &= 6,254 \sin(0 + 20^\circ - 85,914^\circ) = -5,709 \text{ кА}, \end{aligned}$$

а в любой момент времени $i_{Aпк}(t) = 6,254 \sin(\omega t - 65,914^\circ)$.

Значение аperiodической составляющей тока КЗ в начальный момент времени в фазе *A* находится исходя из предположения, что до момента замыкания в сети режим был близок к холостому ходу, т. е.

$$i_{Aak(0)} = -i_{Aпк}(t = 0) = 5,709 \text{ кА},$$

в произвольный момент времени $i_{Aak}(t) = 5,709e^{-t/0,045}$.

График тока КЗ и его составляющих в фазе *A* показан на рис. 1.21.

Время наступления максимума полного тока КЗ в фазе *A* находится из условия максимума периодической составляющей

$$t_{A \max} = \frac{\pi/2 + \varphi_k - \alpha_A}{\omega} = \frac{(90^\circ + 85,914^\circ - 20^\circ) \pi/180^\circ}{314} = 0,0087 \text{ с.}$$

Максимальный ток КЗ в данной фазе составит

$$i_{Ak \max} = I_m \sin(\omega t_{A \max} + \alpha_A - \varphi_k) + i_{Aak 0} e^{-t_{A \max}/\tau_a} = 10,96 \text{ кА}$$

(при нахождении значения периодической составляющей единицы измерения всех углов должны быть одинаковыми — градусы или радианы).

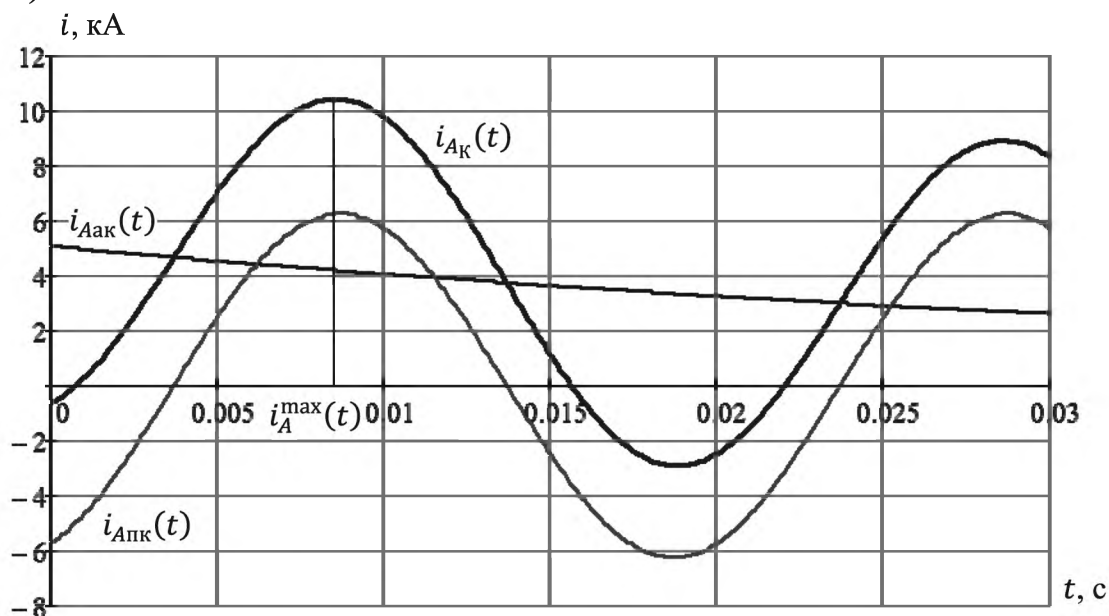


Рис. 1.21. Составляющие тока КЗ в фазе *A* электрической цепи

Значения периодической и аperiodической составляющих тока КЗ в фазах *B* и *C* соответственно равны

$$i_{B\text{ПК}}(t) = I_m \sin\left(\omega t + \alpha_A - \frac{2\pi}{3} - \varphi_K\right) = \\ = 6,254 \sin(314 t - 185,914^\circ);$$

$$i_{B\text{ак}}(0) = -i_{B\text{ПК}}(t=0) = -6,254 \sin(-185,914^\circ) = -0,644 \text{ кА},$$

тогда

$$i_{B\text{ак}}(t) = -0,644 e^{-t/0,045},$$

$$i_{C\text{ПК}}(t) = I_m \sin\left(\omega t + \alpha_A + \frac{2\pi}{3} - \varphi_K\right) = \\ = 6,254 \sin(314 t + 54,086^\circ);$$

$$i_{C\text{ак}}(0) = -i_{C\text{ПК}}(t=0) = -6,254 \sin(54,086^\circ) = -5,065 \text{ кА};$$

$$i_{C\text{ак}}(t) = -5,065 e^{-t/0,045}.$$

На рис. 1.22 приведены графики изменения тока КЗ в фазах *B* и *C*. Время наступления максимума полного тока в фазе *B*, вычисленное как

$$t_{B\text{ max}} = \frac{\pi/2 + \varphi_K - \alpha_B}{\omega} = \frac{(90^\circ + 85,914^\circ - (-100^\circ))}{314} \frac{\pi}{180^\circ} = \\ = \frac{3,14 \cdot 275,914^\circ}{314 \cdot 180^\circ} = 0,0153 \text{ с},$$

не является в действительности временем, при котором ток КЗ в рассматриваемой фазе максимален (рис. 1.22, *a*). Для нахождения истинного времени наступления максимума необходимо скорректировать формулу

$$t_{B\text{ max}} = \frac{\pi/2 + \varphi_K - \alpha_B - \pi}{\omega} = \frac{(275,914^\circ - 180^\circ) \cdot 3,14}{314 \cdot 180^\circ} = \\ = 0,0053 \text{ с},$$

и максимальный ток КЗ в фазе *B* в этом случае составит

$$i_{B\text{К max}} = 6,254 \sin\left(314 \cdot 0,0053 \cdot \frac{180^\circ}{\pi} - 185,914^\circ\right) - \\ - 0,644 e^{-\frac{0,0053}{0,045}} = -6,826 \text{ кА}.$$

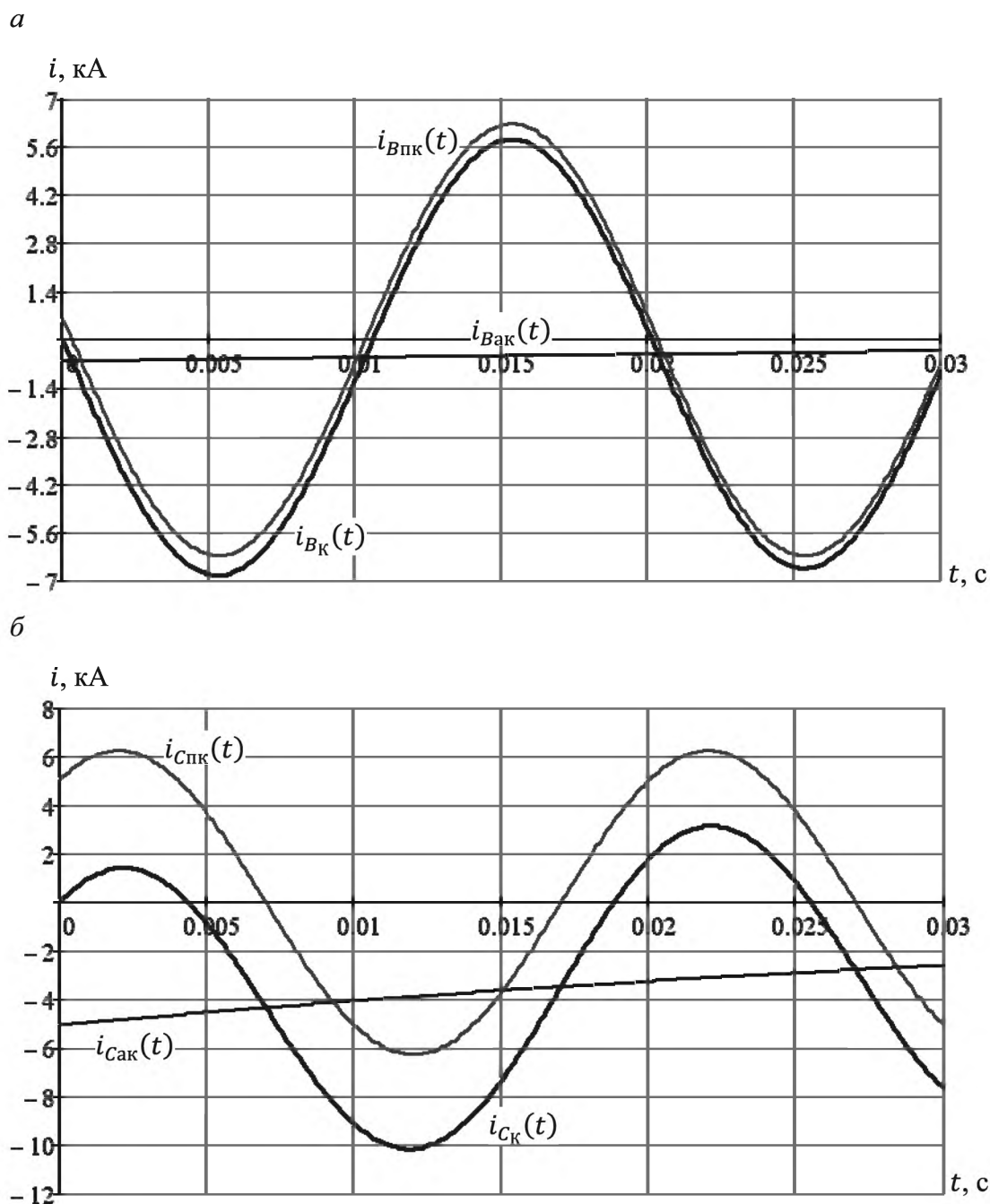


Рис. 1.22. Графики токов КЗ:
a — в фазе *B* электрической цепи; *б* — в фазе *C* цепи

Для фазы *C* (рис. 1.22, *б*) первый положительный максимум периодической составляющей наступает в момент времени $t_{C\text{ max}1}$, но в этот момент времени апериодическая составляющая отрицательна и значение полного тока КЗ максимально, следовательно, необходимо найти время следующего максимума периодической составляющей, а именно:

$$t_{C \max 2} = \frac{\pi/2 + \varphi_K - \alpha_C + \pi}{\omega} =$$

$$= \frac{(90^\circ + 85,914^\circ - 140^\circ + 180^\circ)}{314} \frac{\pi}{180^\circ} = 0,012 \text{ с.}$$

Значение тока $i_{CK \max} = -10,139 \text{ кА}$. Приближенное значение максимального тока КЗ можно вычислить, используя ударный коэффициент. Поскольку $X/R = 28/2 = 14 \geq 5$, то $k_{уд} = 1 + e^{-0,01/\tau_a} = 1,8$ и $i_{уд} = I_m k_{уд} = 6,254 \cdot 1,8 = 11,257 \text{ кА}$ — максимально возможное мгновенное значение тока КЗ в рассматриваемой электрической сети.

Пример 3

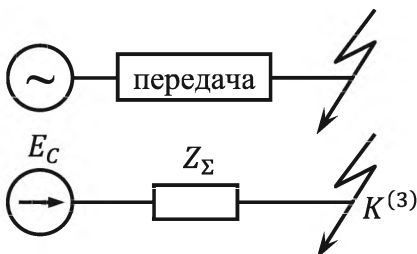


Рис. 1.23. Схема сети

Для простейшей цепи (рис. 1.23) рассчитать ток установившегося КЗ и ударный ток. Определить погрешность расчета тока КЗ без учета активного сопротивления R . Параметры сети: $U_C = 220 \text{ кВ}$, в первом случае $Z_\Sigma^I = 5 + j \cdot 43 \text{ Ом}$, во втором случае $Z_\Sigma^{II} = 5 + j \cdot 15 \text{ Ом}$.

Решение. $E_C = U_C / \sqrt{3} = 127,02 \text{ кВ}$.

Рассмотрим случай, когда $Z_\Sigma^I = 5 + j \cdot 43 \text{ Ом}$, $X/R = 43/5 = 8,6$, при этом $|Z_\Sigma^I| = \sqrt{5^2 + 43^2} = 43,2897 \text{ Ом}$.

Установившееся действующее значение периодической составляющей тока КЗ с учетом R : $I_{пк}^I = E_C / |Z_\Sigma^I| = 127,02 / 43,2897 = 2,934 \text{ кА}$, — без учета R : $I_{пк(R=0)}^I = E_C / X_\Sigma^I = 127,02 / 43 = 2,954 \text{ кА}$. Значение погрешности расчета в первом случае составляет $I_{пк(R=0)}^I / I_{пк}^I = 2,954 / 2,934 = 1,007 \text{ о. е.}$, т. е. погрешность неучета активного сопротивления $0,7 \%$.

Определение постоянной времени затухания апериодической составляющей τ_a невозможно без учета активного сопротивления.

$$\tau_a^I = \frac{X_\Sigma^I}{\omega R_\Sigma^I} = \frac{43}{314 \cdot 5} = 0,0274 \text{ с.}$$

Ударный ток КЗ:

$$i_{уд}^I = \sqrt{2} I_{пк}^I \left(1 + e^{-\frac{0,01}{\tau_a^I}} \right) = \sqrt{2} \cdot 2,934 \left(1 + e^{-\frac{0,01}{0,0274}} \right) = 7,03 \text{ кА},$$

$$\begin{aligned} i_{уд(R=0)}^I &= \sqrt{2} I_{пк(R=0)}^I \left(1 + e^{-\frac{0,01}{\tau_a^I}} \right) = \\ &= \sqrt{2} \cdot 2,954 \left(1 + e^{-\frac{0,01}{0,0274}} \right) = 7,08 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Для варианта $X/R = 15/5 = 3$ и $|Z_{\Sigma}^{II}| = \sqrt{5^2 + 15^2} = 15,811 \text{ Ом}$ установившееся действующее значение периодической составляющей тока КЗ с учетом R равно $I_{пк}^{II} = E_C / |Z_{\Sigma}^{II}| = 127,02 / 15,811 = 8,034 \text{ кА}$ и без учета R составляет $I_{пк(R=0)}^{II} = E_C / X_{\Sigma}^{II} = 127,02 / 15 = 8,468 \text{ кА}$. Значение погрешности расчета в данном случае составляет уже $I_{пк(R=0)}^{II} / I_{пк}^{II} = 8,468 / 8,034 = 1,054 \text{ о. е.}$, т. е. погрешность при отказе от учета активного сопротивления 5,4 %.

Постоянная времени $\tau_a^{II} = 15 / (314 \cdot 5) = 0,0096 \text{ с}$, можно найти ударный ток, определив $\varphi_K = \text{arctg}(X/R) = \text{arctg}(15/5) = 71,57^\circ = 1,249 \text{ рад}$,

$$\begin{aligned} i_{уд}^{II} &= \sqrt{2} \cdot I_{пк}^{II} \left(1 + e^{-t_{уд}/\tau_a^{II}} \right) = \sqrt{2} \cdot I_{пк}^{II} (1 + e^{-t_{уд}/\tau_a}) = \\ &= \sqrt{2} \cdot 8,034 (1 + e^{-0,00898/0,0096}) = 15,82 \text{ кА}, \end{aligned}$$

где $t_{уд} = 0,01(0,5 + \varphi_K/\pi) = 0,01(0,5 + 1,249/3,14) = 0,00898 \text{ с}$,

$$\begin{aligned} i_{уд}^{II} &= \sqrt{2} I_{пк}^{II} \left(1 + e^{-t_{уд}/\tau_a^{II}} \right) = \sqrt{2} \cdot 8,034 (1 + e^{-0,00898/0,0096}) = \\ &= 15,82 \text{ кА}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_{уд(R=0)}^{II} &= \sqrt{2} I_{пк(R=0)}^{II} \left(1 + e^{-t_{уд}/\tau_a^{II}} \right) = \\ &= \sqrt{2} \cdot 8,468 (1 + e^{-0,00898/0,0096}) = 16,68 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Пример 4

Для сети на рис. 1.24 выполнить приведение параметров схемы замещения (в именованных и относительных единицах) к одной ступени напряжения — напряжению точки КЗ — с учетом среднеэкс-

плутационных коэффициентов трансформации. Параметры схемы: $x'' = 0,254 \text{ Ом}$, фазная $E'' = 11,43 \text{ кВ}$ ($S_H = 235,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_H = 18 \text{ кВ}$), фактические коэффициенты трансформации $k_{T1} = 18/347$, $x_2 = 108,4 \text{ Ом}$, $k_{T2} = 330/242$, $x_3 = 33,06 \text{ Ом}$, $k_{T3} = 230/115$.

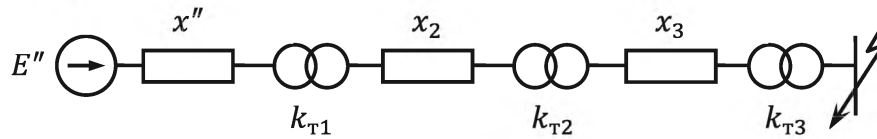


Рис. 1.24. Схема ЭС

Решение. Выполним приведение параметров схемы замещения в именованных единицах (рис. 1.25). Средние эксплуатационные напряжения: 18, 115, 230, 340 кВ.

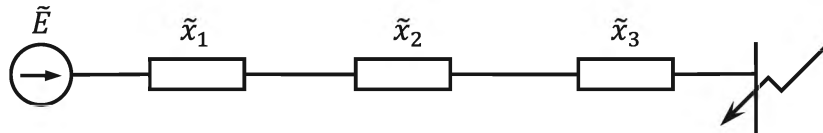


Рис. 1.25. Схема замещения, приведенная к одной ступени напряжения

Согласно исходным данным КЗ произошло на ступени напряжения 115 кВ, параметры, приведенные к этой ступени, следующие:

$$\begin{aligned} \tilde{E} &= E'' \frac{1}{k_{T1}^{cp}} \frac{1}{k_{T2}^{cp}} \frac{1}{k_{T3}^{cp}} = 11,43 \cdot \frac{340}{18} \cdot \frac{230}{340} \cdot \frac{115}{230} = \\ &= 73,025 \text{ кВ (фазная ЭДС);} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= x'' \left(\frac{1}{k_{T1}^{cp}} \right)^2 \left(\frac{1}{k_{T2}^{cp}} \right)^2 \left(\frac{1}{k_{T3}^{cp}} \right)^2 = \\ &= 0,254 \cdot \left(\frac{340}{18} \right)^2 \cdot \left(\frac{230}{340} \right)^2 \cdot \left(\frac{115}{230} \right)^2 = 10,37 \text{ Ом;} \end{aligned}$$

$$\tilde{x}_2 = x_2 \left(\frac{1}{k_{T2}^{cp}} \right)^2 \left(\frac{1}{k_{T3}^{cp}} \right)^2 = 108,4 \cdot \left(\frac{230}{340} \right)^2 \cdot \left(\frac{115}{230} \right)^2 = 12,4 \text{ Ом;}$$

$$\tilde{x}_3 = x_3 \left(\frac{1}{k_{T3}^{cp}} \right)^2 = 33,06 \cdot \left(\frac{115}{230} \right)^2 = 8,265 \text{ Ом.}$$

Для определения параметров схемы в относительных единицах необходимо задать базовые значения напряжения и мощности. Пусть

$U_{\text{баз}} = 110 \text{ кВ}$ и $S_{\text{баз}} = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. Определим значения базовых напряжений на каждой ступени по заданным коэффициентам трансформации.

$$U_{\text{баз}}^{(230)} = U_{\text{баз}} k_{\text{т3}}^{\text{ср}} = 110 \cdot \frac{230}{115} = 220 \text{ кВ};$$

$$U_{\text{баз}}^{(340)} = U_{\text{баз}}^{(230)} k_{\text{т2}}^{\text{ср}} = 110 \cdot \frac{230}{115} \cdot \frac{340}{230} = 325,2 \text{ кВ};$$

$$U_{\text{баз}}^{(18)} = U_{\text{баз}}^{(340)} k_{\text{т1}}^{\text{ср}} = 325,2 \cdot \frac{18}{340} = 17,2 \text{ кВ}.$$

В таком случае значения ЭДС и сопротивлений равны, о. е.,

$$E_{(*)} = \frac{E'' \cdot \sqrt{3}}{U_{\text{баз}}^{(18)}} = \frac{11,43 \cdot \sqrt{3}}{17,2} = 1,15;$$

$$x_{1(*)} = x'' \frac{S_{\text{баз}}}{\left(U_{\text{баз}}^{(18)}\right)^2} = 0,254 \cdot \frac{1000}{17,2^2} = 0,86;$$

$$x_{2(*)} = x_2 \frac{S_{\text{баз}}}{\left(U_{\text{баз}}^{(340)}\right)^2} = 108,4 \cdot \frac{1000}{325,2^2} = 1,025;$$

$$x_{3(*)} = x_3 \frac{S_{\text{баз}}}{\left(U_{\text{баз}}^{(230)}\right)^2} = 33,06 \cdot \frac{1000}{220^2} = 0,683.$$

Пример 5

Для схемы электрической системы (рис. 1.26) составить схему замещения и рассчитать ее параметры с приведением их значений к одной ступени напряжения с учетом фактических коэффициентов трансформации.

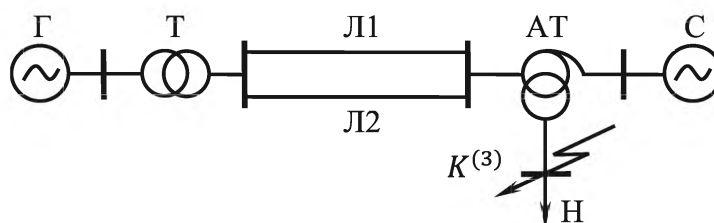


Рис. 1.26. Принципиальная схема ЭС

Следует учесть наличие в нагрузочном узле асинхронной двигательной нагрузки. Привести схему замещения к простейшему виду относительно точки КЗ.

Исходные данные:

- генератор (Г) $S_H = 75 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_H = 10,5 \text{ кВ}$, $I_H = 4,125 \text{ кА}$,
 $x_d'' = 0,215 \text{ Ом}$, $\cos \varphi_H = 0,8$;
- система (С) $U_c = 230 \text{ кВ}$;
- трансформатор (Т) $S_H = 80 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $u_k = 10,5 \%$,
 $U_{В \text{ ном}}/U_{Н \text{ ном}} = 121/10,5 \text{ кВ}$;
- автотрансформатор (АТ) $S_H = 200 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $u_{k \text{ В-Н}} = 34 \%$,
 $u_{k \text{ В-С}} = 10 \%$, $u_{k \text{ С-Н}} = 22,5 \%$,
 $U_{В \text{ ном}}/U_{С \text{ ном}}/U_{Н \text{ ном}} = 230/121/11 \text{ кВ}$;
- линия электропередачи (Л) $\ell = 120 \text{ км}$, $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$;
- нагрузка (Н) $S_H = 60 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_H = 11 \text{ кВ}$.

Решение. Схема замещения ЭС (рис. 1.27) составляется по схемам замещения ее отдельных элементов в порядке расположения их на принципиальной схеме для начального момента $t = 0$.

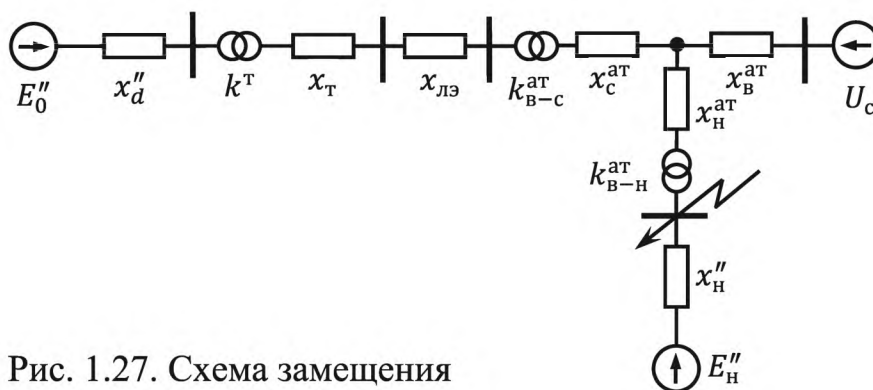


Рис. 1.27. Схема замещения

При составлении схемы замещения руководствуемся следующими допущениями:

- синхронный генератор имеет демпферные обмотки и поэтому представлен своими сверхпереходными параметрами E''_0 и x_d'' ;
- для всех элементов ЭС активные составляющие сопротивлений можно принимать равными нулю;
- для линии электропередачи ввиду отсутствия данных о ее конструктивном исполнении среднее значение удельного сопротивления считается равным $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$;

- нагрузка Н учитывается как обобщенная x''_H и E''_H ;
- сопротивление системы (источник бесконечной мощности) не учитывается;
- все параметры схемы замещения приводятся к одной ступени напряжения, на которой произошло трехфазное КЗ.

Расчет параметров схемы замещения (рис. 1.28) можно выполнить с одновременным приведением их к одной ступени напряжения $U = 11$ кВ.

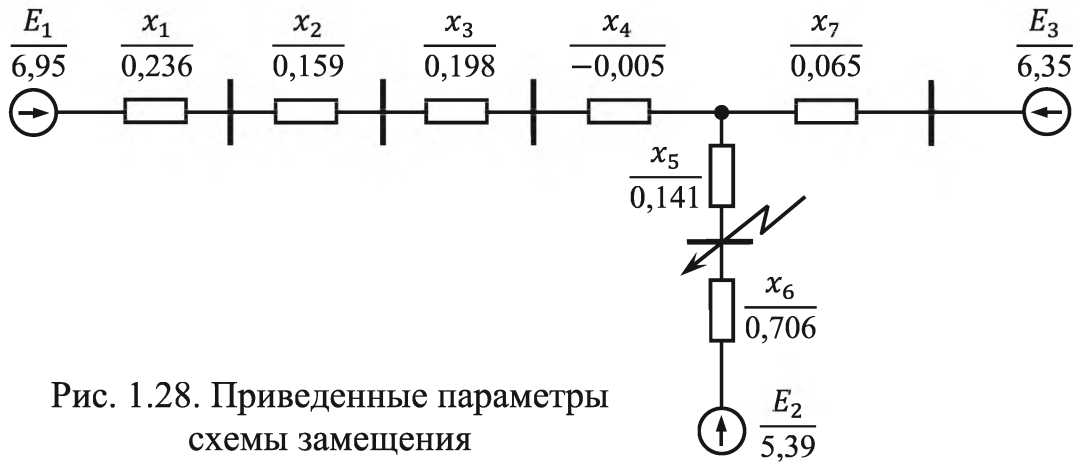


Рис. 1.28. Приведенные параметры
схемы замещения

$$x_1 = \tilde{x}''_d = x''_d \left(\frac{U_{В\text{ НОМ}}^T}{U_{H\text{ НОМ}}^T} \right)^2 \left(\frac{U_{В\text{ НОМ}}^{\text{ат}}}{U_{С\text{ НОМ}}^{\text{ат}}} \right)^2 \left(\frac{U_{H\text{ НОМ}}^{\text{ат}}}{U_{В\text{ НОМ}}^{\text{ат}}} \right)^2 =$$

$$= 0,215 \cdot \left(\frac{121}{10,5} \right)^2 \cdot \left(\frac{230}{121} \right)^2 \cdot \left(\frac{11}{230} \right)^2 = 0,236 \text{ Ом};$$

$$x_2 = \tilde{x}_T = \frac{u_k}{100} \frac{(U_{В\text{ НОМ}}^T)^2}{S_{НОМ}^T} \left(\frac{U_{В\text{ НОМ}}^{\text{ат}}}{U_{С\text{ НОМ}}^{\text{ат}}} \right)^2 \left(\frac{U_{H\text{ НОМ}}^{\text{ат}}}{U_{В\text{ НОМ}}^{\text{ат}}} \right)^2 =$$

$$= \frac{10,5}{100} \cdot \frac{121^2}{80} \cdot \left(\frac{11}{121} \right)^2 = 0,159 \text{ Ом};$$

$$x_3 = \tilde{x}_{лэ} = x_0 \frac{\ell}{2} \left(\frac{U_{В\text{ НОМ}}^{\text{ат}}}{U_{С\text{ НОМ}}^{\text{ат}}} \right)^2 \left(\frac{U_{H\text{ НОМ}}^{\text{ат}}}{U_{В\text{ НОМ}}^{\text{ат}}} \right)^2 = 0,4 \cdot \frac{120}{2} \cdot \left(\frac{11}{121} \right)^2 =$$

$$= 0,198 \text{ Ом};$$

$$x_4 = \tilde{x}_c^{\text{ат}} = \frac{u_{k\text{ В-С}} + u_{k\text{ С-Н}} - u_{k\text{ В-Н}}}{2 \cdot 100} \frac{(U_{H\text{ НОМ}}^{\text{ат}})^2}{S_{НОМ}^{\text{ат}}} =$$

$$= \frac{10 + 22,5 - 34}{200} \cdot \frac{11^2}{200} = -0,005 \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned}
x_5 = \tilde{x}_H^{\text{ат}} &= \frac{u_{k \text{ C-H}} + u_{k \text{ B-H}} - u_{k \text{ B-C}}}{2 \cdot 100} \frac{(U_{\text{H HOM}}^{\text{ат}})^2}{S_{\text{HOM}}^{\text{ат}}} = \\
&= \frac{22,5 + 34 - 10}{200} \cdot \frac{11^2}{200} = 0,141 \text{ Ом}; \\
x_7 = \tilde{x}_B^{\text{ат}} &= \frac{u_{k \text{ B-H}} + u_{k \text{ B-C}} - u_{k \text{ C-H}}}{2 \cdot 100} \frac{(U_{\text{H HOM}}^{\text{ат}})^2}{S_{\text{HOM}}^{\text{ат}}} = \\
&= \frac{10 + 34 - 22,5}{200} \cdot \frac{11^2}{200} = 0,065 \text{ Ом}; \\
x_6 = x_H'' &= 0,35 \frac{U_H^2}{S_H} = 0,35 \cdot \frac{11^2}{60} = 0,706 \text{ Ом}.
\end{aligned}$$

Значения ЭДС генератора, системы и нагрузки составляют

$$\begin{aligned}
E_1 = \tilde{E}_0'' &= \sqrt{\left(\frac{U_H}{\sqrt{3}} + I_H x_d'' \sin \varphi_H\right)^2 + (I_H x_d'' \cos \varphi_H)^2} \times \\
&\times \left(\frac{U_{\text{B HOM}}^{\text{T}}}{U_{\text{H HOM}}^{\text{T}}}\right) \left(\frac{U_{\text{B HOM}}^{\text{ат}}}{U_{\text{C HOM}}^{\text{ат}}}\right) \left(\frac{U_{\text{H HOM}}^{\text{ат}}}{U_{\text{B HOM}}^{\text{ат}}}\right) = \\
&= \sqrt{\left(\frac{10,5}{\sqrt{3}} + 4,125 \cdot 0,215 \cdot 0,6\right)^2 + (4,125 \cdot 0,215 \cdot 0,8)^2} \times \\
&\times \left(\frac{121}{10,5}\right) \cdot \left(\frac{230}{121}\right) \cdot \left(\frac{11}{230}\right) = 6,95 \text{ кВ}; \\
E_2 = E_H'' &= 0,85 \frac{U_H}{\sqrt{3}} = 0,85 \cdot \frac{11}{\sqrt{3}} = 5,39 \text{ кВ}; \\
E_3 = \tilde{E}_C &= \frac{U_C}{\sqrt{3}} \left(\frac{U_{\text{H HOM}}^{\text{ат}}}{U_{\text{B HOM}}^{\text{ат}}}\right) = \frac{230}{\sqrt{3}} \cdot \frac{11}{230} = 6,35 \text{ кВ}.
\end{aligned}$$

Последовательные этапы преобразования схемы замещения представлены на рис. 1.29. Сопротивления x_1, x_2, x_3, x_4 соединены последовательно и заменяются одним $x_8 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 0,236 + 0,159 + 0,198 - 0,005 = 0,588 \text{ Ом}$.

Ветви с источниками E_1 и E_3 заменяются одной эквивалентной с параметрами $x_9 = x_8 x_7 / (x_8 + x_7) = 0,0585 \text{ Ом}$,

$$E_9 = x_9 \left(\frac{E_1}{x_8} + \frac{E_3}{x_7}\right) = 0,0585 \cdot \left(\frac{6,95}{0,588} + \frac{6,35}{0,065}\right) = 6,41 \text{ кВ}.$$

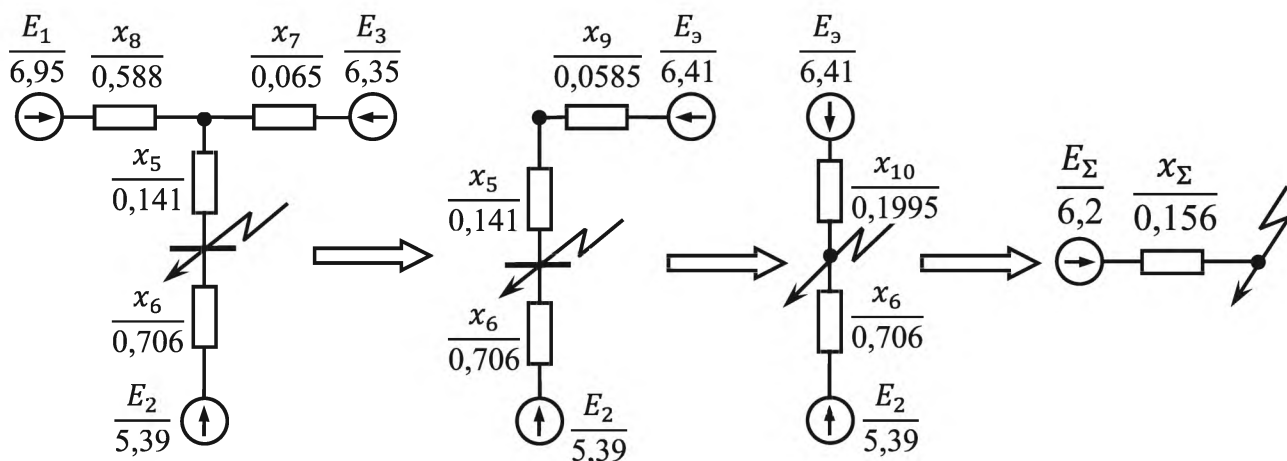


Рис. 1.29. Этапы преобразования схемы замещения

Сопротивления x_9 и x_5 соединяются последовательно:

$$x_{10} = x_9 + x_5 = 0,0585 + 0,141 = 0,1995 \text{ Ом.}$$

По отношению к точке КЗ объединяются параллельно ветви с ЭДС E_3 и E_2 :

$$x_{\Sigma} = \frac{x_{10}x_6}{x_{10}+x_6} = \frac{0,1995 \cdot 0,706}{0,1995 + 0,706} = 0,156 \text{ Ом,}$$

$$E_{\Sigma} = x_{\Sigma} \left(\frac{E_3}{x_{10}} + \frac{E_2}{x_6} \right) = 0,156 \cdot \left(\frac{6,41}{0,1995} + \frac{5,39}{0,706} \right) = 6,2 \text{ кВ.}$$

Пример 6

Для электрической системы, схема которой приведена в примере 5, рассчитать действующее значение периодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени, апериодическую составляющую и ударный ток КЗ.

Решение. Используем расчетные значения параметров преобразованной к простейшему виду схемы замещения ЭС (см. рис. 1.29) из примера 5: $E_{\Sigma} = 6,2 \text{ кВ}$, $x_{\Sigma} = 0,156 \text{ Ом}$.

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени согласно формуле (1.12) со с. 32 определяется как

$$I''_{п,0} = \frac{E_{\Sigma}}{x_{\Sigma}} = \frac{6,2}{0,156} = 39,74 \text{ кА.}$$

Для определения апериодической составляющей тока КЗ необходимо знать эквивалентную постоянную времени затухания этой составляющей. Несмотря на то что в точке КЗ подключены три различных источника (генератор, система, нагрузка), приближенно расчет можно вести по формуле (1.11) со с. 30. По данным табл. 1.4 со с. 30–31 для случая КЗ у сборных шин вторичного напряжения подстанций с трансформаторами мощностью 30 МВ·А (в единице) и выше имеем $x_{\Sigma}/r_{\Sigma} = 15 \div 30$, принимая по верхней оценке $x_{\Sigma}/r_{\Sigma} = 30$, можно определить

$$\tau_{аэ} = x_{\Sigma}/(\omega r_{\Sigma}) = 30/314 = 0,096 \text{ с.}$$

Значение апериодической составляющей тока КЗ

$$i_{ак}(t) = i_{ак}(0)e^{-\frac{t}{\tau_{аэ}}} = \sqrt{2}I''_{п0}e^{-\frac{t}{\tau_{аэ}}} = \sqrt{2} \cdot 39,74e^{-\frac{t}{0,096}} = \\ = 56,2e^{-\frac{t}{0,096}} \text{ кА.}$$

Ударный ток необходимо определять по формуле (1.13) (см. с. 35): КЗ произошло на шинах, к которым подключена обобщенная нагрузка, т. е.

$$i_y = \sqrt{2} \left(I''_{п0}^{(H)} k_y^{(H)} + I''_{п,0}^{(c+г)} k_y^{(c+г)} \right) = \\ = \sqrt{2} \cdot (7,63 \cdot 1 + 32,11 \cdot 1,901) = 97,12 \text{ кА,}$$

где для обобщенной нагрузки

$$I''_{п0}^{(H)} = E_2/x_6 = 5,39/0,706 = 7,63 \text{ кА, } k_y^{(H)} = 1;$$

для ветви «система + генератор»

$$I''_{п0}^{(c+г)} = E_3/x_{10} = 6,41/0,1995 = 32,11 \text{ кА,} \\ k_y^{(c+г)} = 1 + e^{-0,01/\tau_{аэ}} = 1 + e^{-0,01/0,096} = 1,901.$$

Распределение периодической составляющей тока КЗ по ветвям схемы показано на рис. 1.30.

В точке КЗ напряжение равно нулю, $U_a = 0$. Зная $I''_{п0}^{(c+г)}$, можно найти напряжение в узле b . Согласно закону Ома

$$U_b = U_a + I''_{п0}^{(c+г)} x_5 = 32,11 \cdot 0,141 = 4,53 \text{ кВ.}$$

В таком случае периодические составляющие тока КЗ:

- от системы $I_{п0}^c = (E_3 - U_b)/x_7 = (6,35 - 4,53)/0,065 = 28 \text{ кА;}$
- генератора $I_{п0}^{(г)} = (E_1 - U_b)/x_8 = (6,95 - 4,53)/0,588 = 4,11 \text{ кА.}$

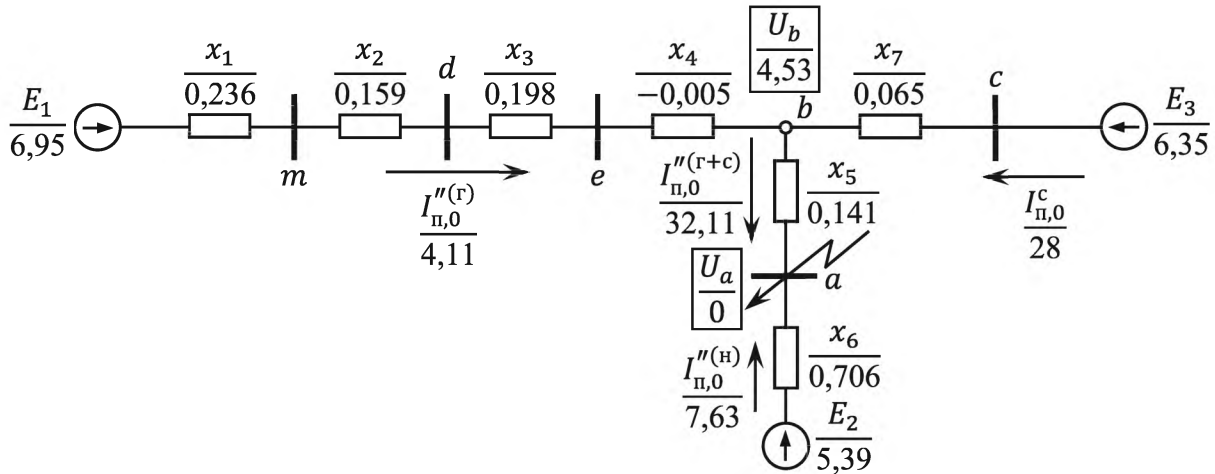


Рис. 1.30. Распределение периодической составляющей тока КЗ по элементам схемы замещения

Необходимо напомнить, что полученные значения токов и напряжений соответствуют приведенной схеме замещения, т. е. являются приведенными к ступени напряжения точки КЗ. С учетом коэффициентов трансформации для элементов рассматриваемой электрической сети имеем

$$U_c = 230 \text{ кВ} \text{ и } I_{п0}^c = \tilde{I}_{п0}^c \frac{U_{Н \text{ ном}}^{\text{ат}}}{U_{В \text{ ном}}^{\text{ат}}} = 28 \cdot \frac{11}{230} = 1,344 \text{ кА.}$$

Ток от двигательной нагрузки, расположенной на ступени низшего напряжения, $I_{п0}^{\prime\prime(\text{H})} = 7,63 \text{ кА.}$

Напряжение в точках e , d и m (рис. 1.30) составляет

$$U_e = (\tilde{U}_b + \tilde{I}_{п0}^{\prime\prime(\text{r})} x_4) \left(\frac{U_{В \text{ ном}}^{\text{ат}}}{U_{Н \text{ ном}}^{\text{ат}}} \right) \left(\frac{U_{С \text{ ном}}^{\text{ат}}}{U_{В \text{ ном}}^{\text{ат}}} \right) = \\ = (4,53 - 0,005 \cdot 4,11) \cdot \frac{121}{11} = 49,6 \text{ кВ;}$$

$$U_d = U_e + \tilde{I}_{п0}^{\prime\prime(\text{r})} x_3 \left(\frac{U_{С \text{ ном}}^{\text{ат}}}{U_{Н \text{ ном}}^{\text{ат}}} \right) = 49,6 + 4,11 \cdot 0,198 \cdot \frac{121}{11} = 58,5 \text{ кВ;}$$

$$U_m = \left(U_d + \tilde{I}_{п0}^{\prime\prime(\text{r})} x_2 \frac{U_{С \text{ ном}}^{\text{ат}}}{U_{Н \text{ ном}}^{\text{ат}}} \right) \frac{U_{Н \text{ ном}}^{\text{т}}}{U_{В \text{ ном}}^{\text{т}}} = \\ = \left(58,5 + 4,11 \cdot 0,159 \cdot \frac{121}{11} \right) \cdot \frac{10,5}{121} = 5,7 \text{ кВ.}$$

Токи на участках сети (действующие значения периодической составляющей тока КЗ) будут равны:

– в ветви генератора и на шинах НН трансформатора Т

$$I_{п0}^{''(г)} = \tilde{I}_{п0}^{''(г)} \frac{U_{Н\ НОМ}^{ат}}{U_{В\ НОМ}^{ат}} \frac{U_{В\ НОМ}^{ат}}{U_{С\ НОМ}^{ат}} \frac{U_{В\ НОМ}^т}{U_{Н\ НОМ}^т} = 4,11 \cdot \frac{11}{230} \cdot \frac{230}{121} \cdot \frac{121}{10,5} = 4,31 \text{ кА};$$

– в линиях

$$I_{п0}^{(л)} = \frac{\tilde{I}_{п0}^{''(г)}}{2} \frac{U_{Н\ НОМ}^{ат}}{U_{В\ НОМ}^{ат}} \frac{U_{В\ НОМ}^{ат}}{U_{С\ НОМ}^{ат}} = \frac{4,11}{2} \cdot \frac{11}{121} = 0,187 \text{ кА}.$$

На рис. 1.31 приведены значения периодической составляющей тока КЗ и напряжений в узлах сети с учетом наличия трансформаторных связей.

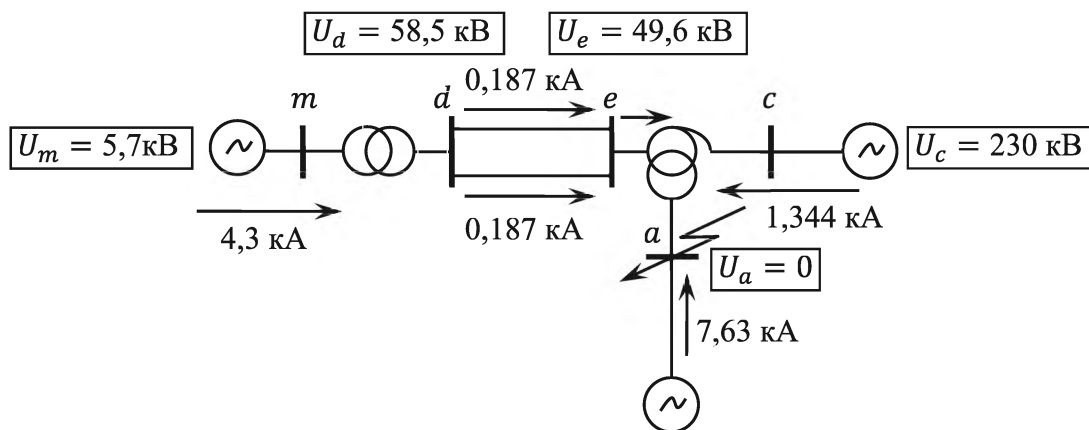


Рис. 1.31. Распределение периодической составляющей (действующего значения) тока КЗ

Пример 7

Рассчитать значения сверхпереходного тока КЗ в месте замыкания и в каждой ветви схемы замещения (рис. 1.32). Найти ударный ток и определить действующее значение полного тока в момент расхождения дугогасительных контактов выключателя $t = 0,2$ с. Для генераторов задано:

генератор 1 — марка ТВФ-63-2УЗ, $I_{НОМ}^{\Gamma 1} = 4,33$ кА, $U_{НОМ}^{\Gamma 1} = 10,5$ кВ;

генератор 2 — ТВВ-160-2ЕУЗ, $I_{НОМ}^{\Gamma 2} = 5,67$ кА, $U_{НОМ}^{\Gamma 2} = 18$ кВ.

Решение. Схема замещения приводится к простейшему виду (рис. 1.33), дальнейшее эквивалентирование нецелесообразно.

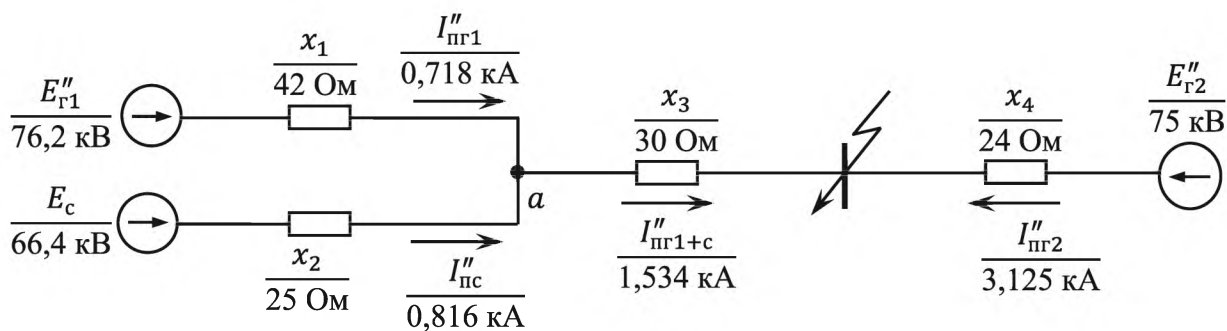


Рис. 1.32. Схема замещения

$$x_5 = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} = \frac{42 \cdot 25}{42 + 25} = 15,67 \text{ Ом},$$

$$x_6 = x_5 + x_3 = 15,67 + 30 = 45,67 \text{ Ом},$$

значение сверхпереходной ЭДС для ветви «генератор 1 + система»

$$E''_{Г1+с} = \left(\frac{E_c}{x_2} + \frac{E''_{Г1}}{x_1} \right) x_5 = \left(\frac{66,4}{25} + \frac{76,2}{42} \right) \cdot 15,67 = 70,05 \text{ кВ}.$$

Сверхпереходный ток (действующее значение периодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени) определяется как

$$I''_{Г1+с} = \frac{E''_{Г1+с}}{x_6} = \frac{70,05}{45,67} = 1,534 \text{ кА}, \quad I''_{Г2} = \frac{E''_{Г2}}{x_4} = \frac{75}{24} = 3,125 \text{ кА}.$$

Значение сверхпереходного тока в точке КЗ

$$I''_{п0} = I''_{Г1+с} + I''_{Г2} = 1,534 + 3,125 = 4,659 \text{ кА}.$$

Ударный ток рассчитывается по схеме замещения ЭС, представленной на рис. 1.33. Первый генераторный источник удален от точки КЗ и при расчете объединяется с системой, т. е. в ударном токе участвуют два независимых источника — генератор 2 и «генератор 1 + система». В таком случае по табл. 1.5 со с. 34 для генератора мощностью 100–200 МВт ударный коэффициент $k_y^{Г2} = 1,965$ ($\tau_a^{Г2} = 0,26 \text{ с}$) и для системы, связанной с точкой КЗ воздушными линиями напряжением 220–330 кВ, постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ $\tau_a^{Г1с} = 0,04 \text{ с}$, а ударный ко-

эффицент $k_y^{\Gamma^1 c} = 1 + e^{-0,01/\tau_a^{\Gamma^1 c}} = 1,779$. Следовательно, ударный ток КЗ

$$i_y = \sqrt{2}(I''_{\text{пг1+c}} k_y^{\Gamma^1 c} + I''_{\text{пг2}} k_y^{\Gamma^2}) = \\ = \sqrt{2} \cdot (1,534 \cdot 1,779 + 3,125 \cdot 1,965) = 12,51 \text{ кА.}$$

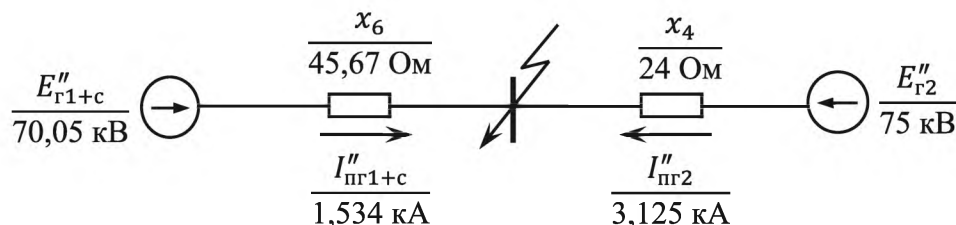


Рис. 1.33. Преобразованная схема

Для нахождения распределения сверхпереходного тока КЗ по ветвям схемы рассчитываются:

- напряжение в точке a (см. рис. 1.32)

$$U_a = I''_{\text{пг1+c}} x_3 = 1,534 \cdot 30 = 46,02 \text{ кВ;}$$

- сверхпереходный ток от первого генератора

$$I''_{\text{пг1}} = \frac{(E''_{Г1} - U_a)}{x_1} = \frac{(76,2 - 46,02)}{42} = 0,72 \text{ кА;}$$

- сверхпереходный ток от системы

$$I''_{\text{пс}} = \frac{(E_c - U_a)}{x_2} = \frac{(66,4 - 46,02)}{24} = 0,85 \text{ кА.}$$

Для определения значения периодической составляющей тока КЗ в заданный момент времени расхождения контактов выключателя следует использовать типовые кривые по виду системы возбуждения генераторов: для генератора 1 согласно рис. 1.16, a , для генератора 2 по рис. 1.15, $б$. Номер кривой выбирается по соотношению (1.14 со с. 39) $I_{*п0(\text{ном})}^{\Gamma^1} = I''_{\text{пг1}}/I_{\text{ном}}^{\Gamma^1} = 0,72/0,375 = 1,92 < 2$, т. е. амплитуда периодической составляющей тока КЗ от генератора 1 не меняется с течением времени, аналогично ведет себя составляющая тока КЗ от системы. Для генератора 2 $I_{*п0(\text{ном})}^{\Gamma^2} = I''_{\text{пг2}}/I_{\text{ном}}^{\Gamma^2} = 3,125/0,843 = 3,7 > 2$, следовательно, для $t = 0,2 \text{ с}$, $\gamma_t = 0,68$, тогда

$$I_{\text{пт}}^{\Gamma^2} = \gamma_t I''_{\text{пг2}} = 0,68 \cdot 3,125 = 2,125 \text{ кА.}$$

Суммарное значение периодической составляющей тока КЗ в точке замыкания для момента времени $t = 0,2$ с будет

$$I_{\text{пт}} = I_{\text{пт}}^{\text{r}2} + I_{\text{пт}1+\text{с}}'' = 2,125 + 1,534 = 3,66 \text{ кА},$$

к указанному моменту времени апериодическая составляющая тока КЗ составит

$$\begin{aligned} i_a(t = 0,2) &= i_{a(0)}^{\text{r}1\text{с}} e^{-\frac{0,2}{\tau_a^{\text{r}1\text{с}}}} + i_{a(0)}^{\text{r}2} e^{-\frac{0,2}{\tau_a^{\text{r}2}}} = \\ &= \sqrt{2} I_{\text{пт}1+\text{с}}'' e^{-\frac{0,2}{\tau_a^{\text{r}1\text{с}}}} + \sqrt{2} I_{\text{пт}2}'' e^{-\frac{0,2}{\tau_a^{\text{r}2}}} = \\ &= \sqrt{2} \cdot 1,534 e^{-\frac{0,2}{0,04}} + \sqrt{2} \cdot 3,125 e^{-\frac{0,2}{0,26}} = 1,46 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Действующее значение полного тока КЗ к моменту $t = 0,2$ с по формуле (1.7 со с. 15)

$$I_{\text{кт}=0,2} = \sqrt{I_{\text{пт}}^2 + i_a(t = 0,2)^2} = \sqrt{3,66^2 + 1,46^2} = 3,93 \text{ кА}.$$

Пример 8

Определить сопротивление реактора, чтобы при возникновении трехфазного КЗ в начале линии, отходящей к потребителю, напряжение на шинах распределительного устройства низшего напряжения подстанции с Т-2 составляло бы не менее 70 % от номинального значения. Расчет выполнить с точным учетом коэффициентов трансформации. Схема сети приведена на рис. 1.34. Оборудование имеет следующие характеристики:

- генератор $S_{\text{ном}} = 125 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ}$; $x_{d(*)}'' = 0,19 \text{ о. н. е.}$ (относительные номинальные единицы); $\cos(\varphi_{\text{н}}) = 0,8$; $I_{\text{ном}} = 6,87 \text{ А}$;
- трансформаторы $S_{\text{ном}}^{\text{T}1} = S_{\text{ном}}^{\text{T}2} = 125 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $u_{\text{k},\%} = 11 \%$,
 для Т-1: $U_{\text{В ном}}^{\text{T}1} / U_{\text{Н ном}}^{\text{T}1} = 121 / 10,5$;
 для Т-2: $U_{\text{В ном}}^{\text{T}2} / U_{\text{Н ном}}^{\text{T}2} = 115 / 10,5$;
- линия: $\ell = 80 \text{ км}$, $x_{\text{уд}} = 0,4 \text{ Ом/км}$.

Решение. Для схемы сети составляется схема замещения и рассматриваются ее параметры.

Генератор:

$$x_d'' = x_{d(*)}'' \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = 0,19 \cdot \frac{10,5^2}{125} = 0,167 \text{ Ом},$$

$$\begin{aligned}
 E'' &\approx \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} + I_{\text{НОМ}} x_d'' \sin(\varphi_{\text{НОМ}}) = \\
 &= \frac{10,5}{\sqrt{3}} + 6,87 \cdot 0,167 \cdot 0,6 = 6,75 \text{ кВ}.
 \end{aligned}$$

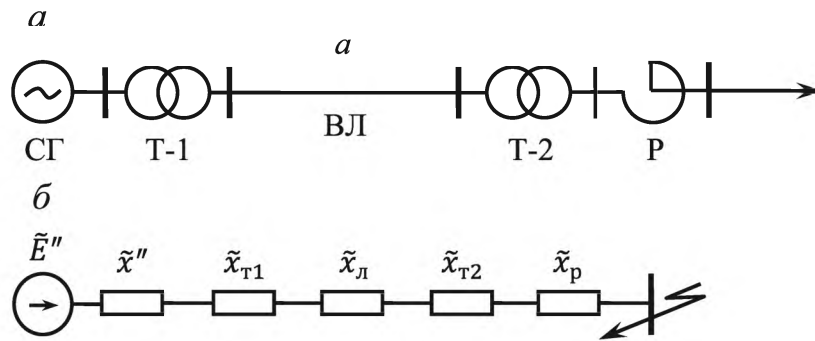


Рис. 1.34. Схемы к примеру 8:

a – схема сети;

б – схема замещения с приведенными параметрами

Линия: $x_L = x_{уд} \ell = 0,4 \cdot 80 = 32 \text{ Ом}$.

Трансформаторы:

$$x_{T1} = \frac{u_{k,\%}}{100} \frac{(U_{\text{В НОМ}}^{T1})^2}{S_{\text{НОМ}}^{T1}} = \frac{11 \cdot 121^2}{100 \cdot 125} = 12,88 \text{ Ом},$$

$$x_{T2} = \frac{u_{k,\%}}{100} \frac{(U_{\text{В НОМ}}^{T2})^2}{S_{\text{НОМ}}^{T2}} = \frac{11 \cdot 115^2}{100 \cdot 125} = 11,638 \text{ Ом}.$$

Далее приводят параметры схемы замещения к классу напряжения 10,5 кВ (КЗ происходит на линии, отходящей к потребителю). Приведенные значения сопротивлений и ЭДС генератора составляют:

$$\tilde{x}'' = 0,167 \cdot \frac{121^2}{10,5^2} \cdot \frac{10,5^2}{115^2} = 0,184 \text{ Ом};$$

$$\tilde{E}'' = 6,75 \cdot \frac{121}{10,5} \cdot \frac{10,5}{115} = 7,102 \text{ кВ};$$

$$\tilde{x}_L = 32 \cdot \frac{10,5^2}{115^2} = 0,267 \text{ Ом};$$

$$\tilde{x}_{T1} = 12,88 \cdot \frac{10,5^2}{115^2} = 0,107 \text{ Ом};$$

$$\tilde{x}_{T2} = 11,638 \cdot \frac{10,5^2}{115^2} = 0,097 \text{ Ом}.$$

Эквивалентируя схему к виду, приведенному на рис. 1.35, получим

$$x_{\Sigma} = \tilde{x}_d'' + \tilde{x}_{T1} + \tilde{x}_l + \tilde{x}_{T2} = 0,184 + 0,107 + 0,26 + 0,097 = 0,648 \text{ Ом}.$$

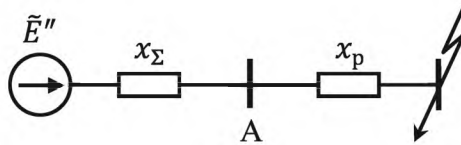


Рис. 1.35. Эквивалентная схема замещения

На шинах подстанции линейное значение напряжения должно быть $U_A^{\text{доп}} = 0,7 \cdot 10,5 = 7,35 \text{ кВ}$, а фазное $U_A^{\Phi} = 7,35/\sqrt{3} = 4,24 \text{ кВ}$. При этих условиях определяется допустимое значение тока КЗ, протекающего по x_{Σ} ,

$$I_{п,0} = (\tilde{E}'' - U_A^{\Phi})/x_{\Sigma} = (7,102 - 4,24)/0,648 = 4,42 \text{ кА}.$$

В таком случае $x_p = U_A^{\Phi}/I_{п,0} = 4,24/4,42 = 0,96 \text{ Ом}$. Согласно полученному значению можно подобрать необходимый реактор.

Пример 9

На подстанции (рис. 1.36) установлен синхронный компенсатор (СК) со следующими номинальными параметрами: $S_{\text{ном}} = 30 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $x_{d(*)}'' = 0,22 \text{ о. н. е.}$; $U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ}$. Определить в омах величину реактивности реактора Р, которая должна быть введена в цепь СК, чтобы в начальный момент его асинхронного пуска напряжение на выводах СК составляло 50 % от номинального значения. Найти при этих условиях на шинах, к которым подключена нагрузка Н, величину остаточного напряжения.

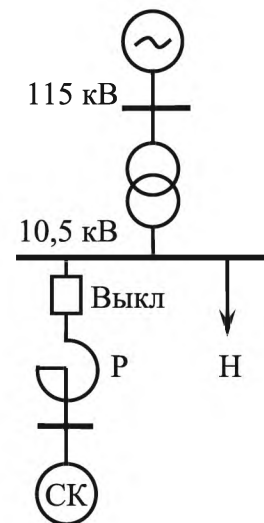


Рис. 1.36. Схема к примеру 9

Система: $S = \infty$; $E_c = 113$ кВ; $x_c = 11$ Ом.

Трансформатор: $S_{\text{ном}} = 60$ МВ·А; $k_T = 110/11$; $u_{k,\%} = 10,5$ %.

Нагрузка: $S_{\text{нагр}} = 45$ МВ·А; $x'' = 0,35$ о. е; $E'' = 0,85$ о. е.;

$$U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ.}$$

Решение. Расчет производится в именованных единицах с приведением к ступени напряжения точки КЗ через фактические коэффициенты трансформации.

Система:

$$\tilde{x}_c = x_c \left(\frac{1}{k_T} \right)^2 = 11 \cdot \frac{11^2}{110^2} = 0,11 \text{ Ом,}$$

$$\tilde{E}_c = \frac{E_c}{\sqrt{3}} \frac{1}{k_T} = \frac{113 \cdot 11}{\sqrt{3} \cdot 110} = 6,52 \text{ кВ.}$$

Трансформатор:

$$\tilde{x}_T = \frac{u_{k,\%}}{100} \frac{U_{\text{н ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{10,5 \cdot 11^2}{100 \cdot 60} = 0,21 \text{ Ом.}$$

Нагрузка обобщенная:

$$\tilde{x}_{\text{нагр}}'' = 0,35 \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}} = 0,35 \cdot \frac{10,5^2}{45} = 0,86 \text{ Ом,}$$

$$\tilde{E}_{\text{нагр}}'' = 0,85 \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3}} = 0,85 \cdot \frac{10,5}{\sqrt{3}} = 5,15 \text{ кВ.}$$

Синхронный компенсатор:

$$\tilde{x}_{\text{ск}}'' = x_{d(*)}'' \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}} = 0,22 \cdot \frac{10,5^2}{30} = 0,81 \text{ Ом.}$$

Приведем схему к простому виду. Для этого определяется эквивалентное сопротивление для последовательно соединенных элементов $x_1 = \tilde{x}_T + \tilde{x}_c = 0,21 + 0,11 = 0,32$ Ом. Далее объединяются источники «система» и «нагрузка»:

$$x_2 = \frac{x_1 \tilde{x}_{\text{нагр}}''}{x_1 + \tilde{x}_{\text{нагр}}''} = \frac{0,32 \cdot 0,86}{0,32 + 0,86} = 0,233 \text{ Ом,}$$

$$E_{\Sigma} = \left(\frac{\tilde{E}_c}{x_1} + \frac{\tilde{E}_{\text{нагр}}''}{\tilde{x}_{\text{нагр}}''} \right) x_2 = \left(\frac{6,52}{0,32} + \frac{5,15}{0,86} \right) \cdot 0,233 = 6,14 \text{ кВ.}$$

Асинхронный пуск синхронного компенсатора соответствует режиму КЗ В то же время по условию задачи требуется, чтобы при асинхронном пуске СК напряжение на его выводах (в точке А рис. 1.37) составляло не менее 50 % от номинального. Следовательно, пусковой ток СК должен быть не более чем

$$I_{\text{п0}}^{\text{СК}} = \frac{U_A^{\text{доп}}}{\sqrt{3} \tilde{x}_{\text{СК}}''} = \frac{0,5 \cdot 10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,81} = 3,74 \text{ кА.}$$

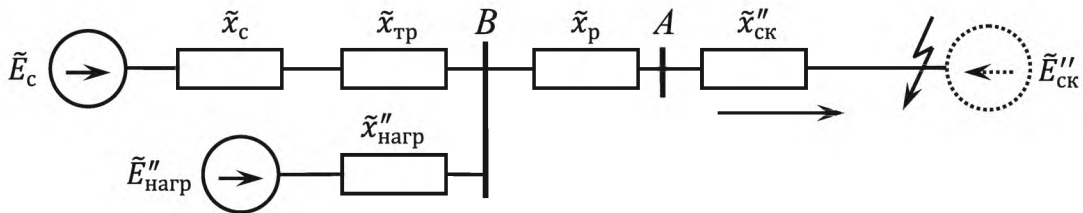


Рис. 1.37. Схема замещения с приведенными параметрами

Кроме того, сопротивление реактора выбирается таким образом, чтобы ток от системы и нагрузки не превышал пускового тока СК:

$$I_{\text{п0}}^{\text{С+Н}} = I_{\text{п0}}^{\text{СК}} = \frac{E_{\Sigma}}{x_2 + x_p + \tilde{x}_{\text{СК}}''},$$

т. е. $6,14 / (0,233 + x_p + 0,81) = 3,74$, отсюда $x_p = 0,599 \text{ Ом}$.

Можно составить другое выражение для нахождения сопротивления реактора:

$$\frac{E_{\Sigma} - U_A^{\text{доп}}}{x_2 + x_p} = I_{\text{п0}}^{\text{СК}}.$$

Напряжение на шинах ПС (точка В, рис. 1.37) при асинхронном пуске синхронного компенсатора снизится до величины $U_B = 0 + I_{\text{п0}}^{\text{СК}}(x_p + \tilde{x}_{\text{СК}}'') = 3,74 \cdot (0,599 + 0,81) = 5,27 \text{ кВ}$. Линейное напряжение в точке В составит $5,27 \cdot \sqrt{3} = 9,13 \text{ кВ}$. Снижение напряжения в процентах составит

$$\frac{U_{\text{ном}} - U_B}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \% = \frac{10,5 - 9,13}{10,5} \cdot 100 = 13,05 \%.$$

Пример 10

Определить ток в конце воздушной линии 110 кВ в момент отключения трехфазного КЗ, если в начале линии значение тока $I_{п0}$ составляет 25 кА. Линия выполнена проводом АС-95, $x_{уд} = 0,39$ Ом/км, $r_{уд(+20^\circ)} = 0,315$ Ом/км, длина 10 км. Начальная температура проводов линии $\theta_{нач}$ составляет 30 °С, полное время отключения цепи КЗ $t_{отк}$ 0,5 с.

Решение. На рис. 1.38 приведена схема замещения, соответствующая условиям задачи. Условная температура для алюминия 236 °С, тогда активное сопротивление линии при указанной температуре по формуле (1.17) (см. с. 45) составляет

$$R_{лин} = r_{уд(+20^\circ)} \ell \frac{\theta_{ус} + \theta_{нач}}{\theta_{ус} + \theta_{норм}} = 0,315 \cdot 10 \cdot \frac{236 + 30}{236 + 20} = 3,27 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление проводов линии

$$X_{лин} = x_{уд} \ell = 0,39 \cdot 10 = 3,9 \text{ Ом.}$$

Характеристики системы:

$$x_c = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3} I_{п0}} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 25} = 2,65 \text{ Ом,} \quad E_c = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3}} = 66,4 \text{ кВ.}$$

Суммарное сопротивление участка $Z_\Sigma = R_{лин} + j(X_c + X_{лин}) = 3,27 + j \cdot 6,44$ Ом. Соотношение $R_\Sigma / X_\Sigma = 3,27 / 6,44 = 0,507 > 0,2$ показывает, что активное сопротивление составляет более 20 % от индуктивного, следовательно, необходимо тепловой спад тока КЗ учитывать.

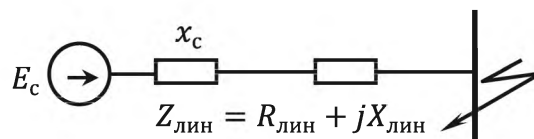


Рис. 1.38. Схема замещения

Начальное действующее значение периодической составляющей тока металлического КЗ $I_{п0} = E_c / |Z_\Sigma| = 66,4 / \sqrt{3,27^2 + 6,44^2} = 9,19$ кА. К моменту отключения замыкания через 0,5 с температура проводов линии изменяется в соответствии с формулой (1.21) со с. 46.

Из табл. 1.6 со с. 47 выбираем необходимые коэффициенты для алюминия $K_1 = 148 \text{ А} \cdot \text{с}^{0,5} / \text{мм}^2$, $\beta = 228^\circ \text{C}$, тогда

$$\begin{aligned}\theta_{\text{кон}} &= (\theta_{\text{нач}} + \beta) \cdot \exp\left(\frac{I_{\text{пт}}^2 t_{\text{отк}}}{K_1^2 S^2 \varepsilon^2}\right) - \beta = \\ &= (30^\circ + 228^\circ) \cdot \exp\left(\frac{9193^2 \cdot 0,5}{148^2 \cdot 95^2 \cdot 1^2}\right) - 228^\circ = 91,49^\circ.\end{aligned}$$

Отсюда коэффициент K_θ , рассчитанный по формуле (1.20), составляет $K_\theta = (\theta_{\text{ус}} + \theta_{\text{кон}}) / (\theta_{\text{ус}} + \theta_{\text{нач}}) = (236 + 91,49) / (236 + 30) = 1,231$ и активное сопротивление линии к моменту отключения замыкания согласно формуле (1.19) $R_{\theta,t} = K_\theta R_{\text{лин}} = 1,231 \cdot 3,27 = 4,025 \text{ Ом}$.

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ к моменту его отключения составляет:

– при металлическом КЗ

$$I_{\text{пт}} = \frac{E_c}{\sqrt{R_{\theta t}^2 + X_\Sigma^2}} = \frac{66,4}{\sqrt{4,025^2 + 6,44^2}} = 8,74 \text{ кА};$$

– при дуговом КЗ

$$\begin{aligned}I_{\text{пт}} &= \frac{E_c}{\sqrt{(R_{\theta t} + R_d)^2 + X_\Sigma^2}} = \frac{66,4}{\sqrt{(4,02 + 1,8)^2 + 6,44^2}} = \\ &= 7,65 \text{ кА},\end{aligned}$$

где $R_d = 1,8 \text{ Ом}$ по рис. 1.20, в со с. 44 для ВЛ 110 кВ, $t_{\text{отк}} = 0,5 \text{ с}$, $I_{\text{п0}} = 9,193 \text{ кА}$ (10 кА).

Снижение тока КЗ под влиянием теплового спада и электрической дуги составляет 16,8 %.

Пример 11

Для схемы ЭС, приведенной на рис. 1.39, определить $i_{\text{уд}}$ для $K^{(3)}$ в точках К1 и К2, рассмотреть влияние длины кабеля (0—1 км) на $i_{\text{уд}}$. Элементы схемы имеют следующие характеристики: система $U_{\text{сист}} = 230 \text{ кВ}$, генератор $S_{\text{ном}} = 117,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ}$, $\tau_a = 0,417 \text{ с}$, $x''_{d(*)} = 0,183 \text{ о. н. е.}$, $\cos \varphi_H = 0,85$. Трансформатор $S_{\text{ном}} =$

$= 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $k_T = 230/11$, $u_{k\%} = 12,5 \%$, $x/r = 27$. ЛЭП выполнена из провода АС-300, $\ell = 100 \text{ км}$, $x_0 = 0,429 \text{ Ом/км}$, $r_0 = 0,098 \text{ Ом/км}$. Кабель АЗ×120, $x_0 = 0,076 \text{ Ом/км}$, $r_0 = 0,27 \text{ Ом/км}$.

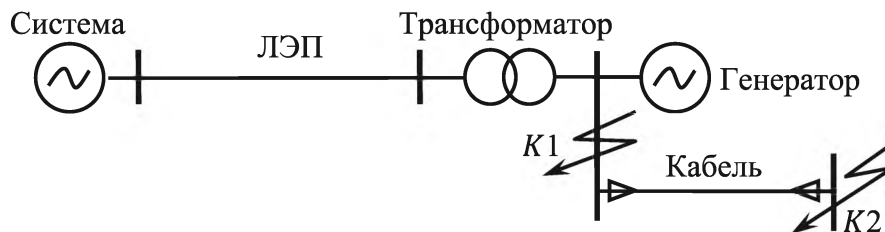


Рис. 1.39. Схема сети

Решение. Рассчитаем параметры схемы замещения.

Система: $E_c = 230/\sqrt{3} = 132,9 \text{ кВ}$.

ЛЭП: АС-300, $x_{\text{ЛЭП}} = 42,9 \text{ Ом}$, $r_{\text{ЛЭП}} = 9,8 \text{ Ом}$.

Трансформатор:

$$x_{\text{тр}} = \frac{u_{k\%}}{100} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{12,5}{100} \cdot \frac{11^2}{100} = 0,151 \text{ Ом}, \quad r_{\text{тр}} = \frac{x_{\text{тр}}}{27} = 0,0056 \text{ Ом}.$$

Генератор: $x_d'' = x_{d(*)}'' U_{\text{НОМ}}^2 / S_{\text{НОМ}} = 0,183 \cdot 10,5^2 / 117,5 = 0,172 \text{ Ом}$,

$$\begin{aligned} E'' &= \sqrt{\left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} + x_d'' I_{\text{НОМ}} \sin \varphi_{\text{НОМ}} \right)^2 + (x_d'' I_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}})^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{10,5}{\sqrt{3}} + 0,172 \cdot \frac{117,5}{\sqrt{3} \cdot 10,5} \cdot 0,526 \right)^2 + \left(0,172 \cdot \frac{117,5}{\sqrt{3} \cdot 10,5} \cdot 0,85 \right)^2} = \\ &= 6,72 \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Приведем параметры к одной ступени напряжения:

$$\tilde{E}_c = (11/230) \cdot 132,9 = 6,36 \text{ кВ},$$

$$\tilde{z}_{\text{ЛЭП}} = (9,8 + j \cdot 42,9) \cdot 11^2 / 230^2 = 0,022 + j \cdot 0,098 \text{ Ом}.$$

Сопротивление трансформатора и генератора, ЭДС генератора уже были рассчитаны на ступени напряжения точки КЗ. Схема замещения с приведенными параметрами показана на рис. 1.40, а. После ряда преобразований получим схему, как на рис. 1.40, б.

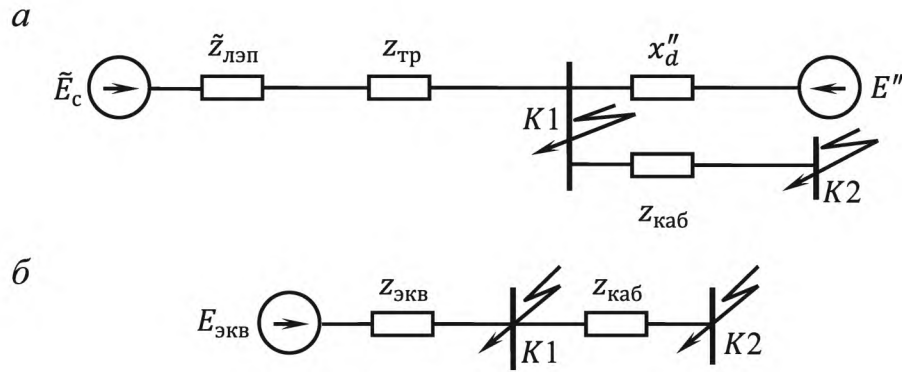


Рис. 1.40. Схема замещения с приведенными параметрами (а) и эквивалентная схема (б)

$$Z_{экв} = \frac{(jx_d'')(\tilde{Z}_{лэп} + Z_{тр})}{\tilde{Z}_{лэп} + Z_{тр} + jx_d''} = 0,005 + j \cdot 0,102 = 0,102 \angle 87,425^\circ \text{ Ом},$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{экв} &= \left(\frac{E_c}{\tilde{Z}_{лэп} + Z_{тр}} + \frac{E''}{jx_d''} \right) Z_{экв} = \left(\frac{6,351}{0,0276 + j \cdot 0,249} + \frac{6,713}{j \cdot 0,172} \right) \times \\ &\times (0,005 + j \cdot 0,102) = 6,564 \angle -0,085^\circ \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Сопротивление кабеля зависит от его длины:

$$Z_{каб} = 0,27\ell + j \cdot 0,076\ell \text{ Ом}.$$

При коротком замыкании в точке $K1$ действующее значение периодической составляющей тока определяется как

$$\begin{aligned} |i_{п0}| &= \left| \frac{\dot{E}_{экв}}{\dot{Z}_{экв}} \right| = \left| \frac{6,564 \angle -0,085^\circ}{0,102 \angle 87,425^\circ} \right| = |64,35 \angle -87,51^\circ| = \\ &= 64,35 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Значение тока от каждого из источников — системы и генератора — составляет

$$i_{п0}^{сист} = \frac{E_c}{\tilde{Z}_{лэп} + Z_{тр}} = 2,79 - j \cdot 25,2 = 25,35 \angle -83,68^\circ \text{ кА}$$

и

$$i_{п0}^{ген} = \frac{E''}{jx_d''} = -j \cdot 39,029 = 39,029 \angle -90^\circ \text{ кА}.$$

Скорость затухания аperiodических составляющих токов $K3$ от генератора и системы определяется значениями

$$\tau_a^{\text{сист}} = \frac{(x_{\text{лэп}} + x_{\text{тр}})}{\omega(r_{\text{лэп}} + r_{\text{тр}})} = \frac{0,249}{314 \cdot 0,0276} = 0,029 \text{ с и } \tau_a^{\text{ген}} = 0,417 \text{ с},$$

тогда величина ударного тока в точке К1

$$i_{\text{уд}} = i_{\text{уд}}^{\text{сист}} + i_{\text{уд}}^{\text{ген}} = \sqrt{2} I_{\text{п0}}^{\text{сист}} k_{\text{уд}}^{\text{сист}} + \sqrt{2} I_{\text{п0}}^{\text{ген}} k_{\text{уд}}^{\text{ген}} = \sqrt{2} \cdot 25,35 \times \\ \times \left(1 + e^{\frac{-0,01}{0,029}}\right) + \sqrt{2} \cdot 39,029 \cdot \left(1 + e^{\frac{-0,01}{0,417}}\right) = 170,33 \text{ кА}.$$

Приближенное значение ударного тока (без разделения источников) составляет

$$i_{\text{уд}}^{\approx} = \sqrt{2} I_{\text{п0}} k_{\text{уд}}^{\approx} = \sqrt{2} \cdot 64,35 \cdot 1,964 = 178,73 \text{ кА},$$

где $k_{\text{уд}}^{\approx} = 1 + e^{-0,01/\tau_a^{\approx}} = 1 + e^{-0,01/0,271} = 1,964,$

$$\tau_a^{\approx} = \frac{x_{\text{э}}(r=0)}{\omega r_{\text{э}}(x=0)} = \frac{0,102}{314 \cdot 0,0012} = 0,271 \text{ с},$$

$$x_{\text{э}}(r=0) = \frac{(x_{\text{тр}} + x_{\text{лэп}})x_d''}{x_{\text{тр}} + x_{\text{лэп}} + x_d''} = \frac{(0,151 + 0,098) \cdot 0,172}{0,151 + 0,098 + 0,172} = 0,102 \text{ Ом},$$

$$r_{\text{э}}(x=0) = \frac{(r_{\text{тр}} + r_{\text{лэп}})r_{\text{ген}}}{r_{\text{тр}} + r_{\text{лэп}} + r_{\text{ген}}} = \frac{(0,0056 + 0,022) \cdot 0,0013}{0,0056 + 0,022 + 0,0013} = 0,0012 \text{ Ом},$$

при этом $r_{\text{ген}} = x_d''/(\tau_a^{\text{ген}}\omega) = 0,172/(0,417 \cdot 314) = 0,0013 \text{ Ом}.$

При КЗ в точке К2 необходимо учитывать характеристики кабеля, которые определяются его длиной: при $\ell = 100 \text{ м}$ $z_{\text{каб}}^{0,1} = 0,027 + j \cdot 0,0076 \text{ Ом}$, при $\ell = 500 \text{ м}$ $z_{\text{каб}}^{0,5} = 0,135 + j \cdot 0,038 \text{ Ом}$, при $\ell = 1000 \text{ м}$ $z_{\text{каб}}^1 = 0,27 + j \cdot 0,076 \text{ Ом}$. Суммарные сопротивления до точки замыкания, значения периодической составляющей тока КЗ и ударного тока сведены в табл. 1.7 и графически отображены на рис. 1.41.

Таблица 1.7

Результаты расчета

Величина	$\ell, \text{ м}$		
	100	500	1000
$z_{\Sigma} = z_{\text{экв}} + z_{\text{каб}}, \text{ Ом}$	$0,032 + j \cdot 0,1096 = 0,1142 \angle 73,7^\circ$	$0,14 + j \cdot 0,14 = 0,198 \angle 45^\circ$	$0,275 + j \cdot 0,178 = 0,328 \angle 32,92^\circ$
$I_{\text{п},0\Sigma} = \dot{E}_{\text{экв}} / z_{\Sigma} , \text{ кА}$	57,48	33,15	20,01
$\tau_{a\Sigma} = x_{\Sigma}/(\omega r_{\Sigma}), \text{ с}$	0,0109	0,0032	0,0021
$k_{\text{уд}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{\tau_{a\Sigma}}}$	1,4	1,044	1,009
$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} I_{\text{п},0\Sigma} k_{\text{уд}}, \text{ кА}$	113,81	48,944	28,553

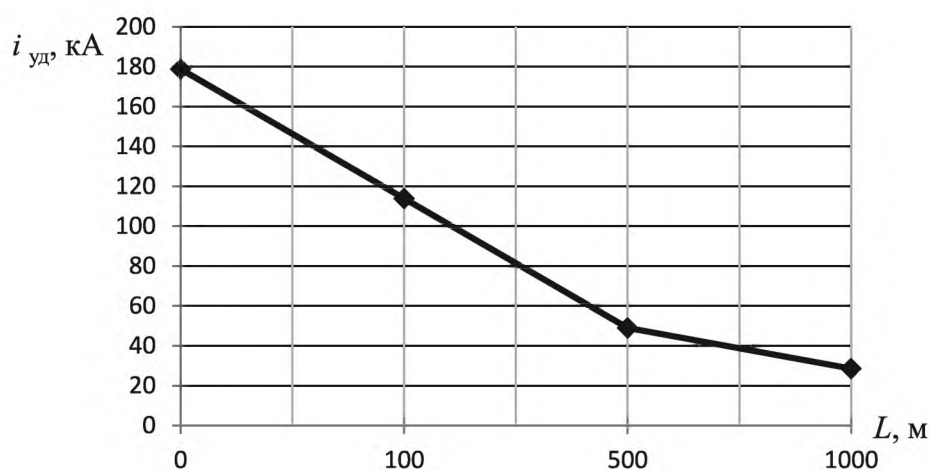


Рис. 1.41. Изменение ударного тока при увеличении длины кабеля

2. ПРИНЦИПЫ АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОДНОКРАТНОМ НАРУШЕНИИ СИММЕТРИИ

Подавляющее большинство режимов ЭС связано с возникновением несимметрии. Несимметрия может быть поперечной (замыкание) и продольной (изменение сопротивления элементов в фазах — обрыв, отключение). Рассматриваемые в данной главе переходные процессы ограничены условием того, что несимметрия возникает

только в одном месте системы, в то время как вся остальная ее часть остается строго симметричной.

Строгий математический анализ несимметричных переходных процессов существенно затруднен тем обстоятельством, что при таких процессах образуется пульсирующее магнитное поле ротора, которое в общем случае вызывает полный спектр высших гармоник.

Основные виды несимметричных коротких замыканий: двухфазное, однофазное, двухфазное на землю.

2.1. Применение метода симметричных составляющих при анализе режимов с однократной несимметрией

Для анализа несимметричных режимов электрических установок пользуются методом симметричных составляющих, из которого следует, что любой несимметричный режим в симметричной системе может быть представлен как сумма трех независимых друг от друга симметричных режимов:

$$\begin{aligned}\dot{F}_A &= \dot{F}_{A0} + \dot{F}_{A1} + \dot{F}_{A2}; \\ \dot{F}_B &= \dot{F}_{B0} + \dot{F}_{B1} + \dot{F}_{B2}; \\ \dot{F}_C &= \dot{F}_{C0} + \dot{F}_{C1} + \dot{F}_{C2},\end{aligned}\tag{2.1}$$

где $\dot{F}_A, \dot{F}_B, \dot{F}_C$ — несимметричные фазные величины (ток или напряжение), $\dot{F}_{A0} - \dot{F}_{C2}$ — симметричные составляющие фаз (рис. 2.1, а).

Выражение (2.1) можно упростить, если ввести вращающие векторы (рис. 2.1, б) вида

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2},$$

тогда $\dot{F}_{B1} = a^2 \dot{F}_{A1}$, $\dot{F}_{B2} = a \dot{F}_{A2}$, $\dot{F}_{C1} = a \dot{F}_{A1}$, $\dot{F}_{C2} = a^2 \dot{F}_{A2}$.

Представление в форме матриц позволяет записать

$$F_f = [S] \cdot F_s,$$

где F_f — вектор фазных величин; $[S]$ — матрица коэффициентов симметричных составляющих; F_s — вектор симметричных составляющих.

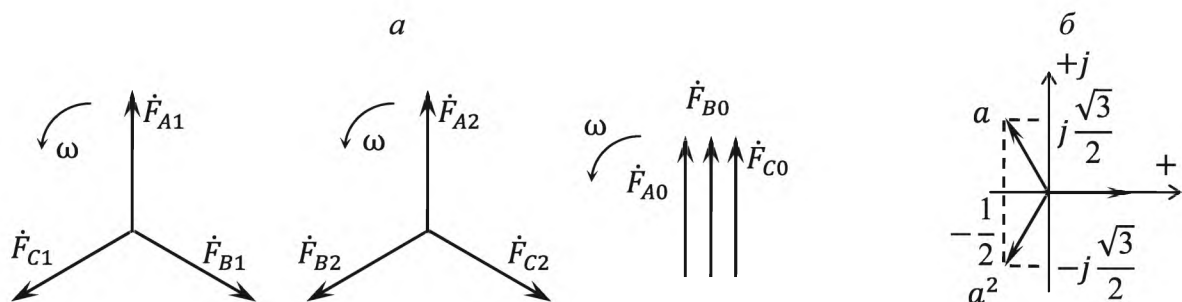


Рис. 2.1. Трехфазная система векторов:
 a – симметричные составляющие; b – вращающиеся векторы

Используя обратное преобразование, можно получить

$$F_S = [S]^{-1} \cdot F_f, \quad (2.2)$$

где $[S]^{-1}$ — обратная матрица коэффициентов

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}, \quad [S]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}.$$

Если проанализировать физическую картину протекания несимметричного переходного процесса в СМ, то можно увидеть, что непосредственно применять метод симметричных составляющих в той форме, что приведена выше, нельзя. Это обусловлено тем, что токи различных последовательностей оказываются связанными между собой через бесконечный спектр гармоник. Полный спектр гармоник токов в СМ возникает в результате несимметрии токов основной гармоники в фазах и несимметрии самой СМ. В связи с этим для практических расчетов обычно довольствуются лишь учетом основных гармоник токов и напряжений, что в большинстве случаев является приемлемым с точки зрения допустимой погрешности.

В случае, если применяется метод симметричных составляющих, для анализируемой электрической сети строится три независимых друг от друга схемы замещения — прямой, обратной и нулевой последовательности — и определяются соответствующие сопротивления прямой $Z_{1\Sigma}$, нулевой $Z_{0\Sigma}$, обратной $Z_{2\Sigma}$ последовательности. Тогда для точки несимметрии можно записать

$$\Delta \dot{U}_0 = Z_{0\Sigma} \dot{I}_0, \quad \Delta \dot{U}_1 = Z_{1\Sigma} \dot{I}_1, \quad \Delta \dot{U}_2 = Z_{2\Sigma} \dot{I}_2. \quad (2.3)$$

При учете источников в уравнения (2.3) следует ввести ЭДС соответствующих последовательностей. Известно, что в СМ возникают ЭДС обратной последовательности \dot{E}_2 и нулевой \dot{E}_0 , являющиеся реакцией СМ на протекание в статоре токов нулевой \dot{I}_0 и обратной \dot{I}_2 последовательности. Таким образом, ЭДС \dot{E}_2 и \dot{E}_0 удобнее учитывать в форме падения напряжения. При этом принято считать, что АРВ всех СМ реагируют только на основную гармонику, т. е. включены через фильтр прямой последовательности.

Итак, для режима с поперечной несимметрией можно записать

$$\dot{U}_0 = 0 - Z_{0\Sigma}\dot{I}_0, \quad \dot{U}_1 = \dot{E}_{1\Sigma} - Z_{1\Sigma}\dot{I}_1, \quad \dot{U}_2 = 0 - Z_{2\Sigma}\dot{I}_2, \quad (2.4)$$

где $\dot{U}_0, \dot{U}_1, \dot{U}_2$ и $\dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ — симметричные составляющие напряжений и токов в точке несимметрии; $Z_{0\Sigma}, Z_{1\Sigma}, Z_{2\Sigma}$ — результирующие сопротивления нулевой, прямой и обратной последовательности относительно точки несимметрии; $\dot{E}_{1\Sigma}$ — результирующая ЭДС прямой последовательности. При продольной несимметрии \dot{U} заменяется на $\Delta\dot{U}$.

Все уравнения, в т. ч. уравнения прямой последовательности, содержат остаточные напряжения, включенные в точку несимметрии. Поэтому ток \dot{I}_1 течет от источника ЭДС в точку несимметрии, в то время как токи \dot{I}_0 и \dot{I}_2 направлены в противоположную сторону.

2.2. Анализ граничных условий в месте несимметрии при однофазном коротком замыкании $K^{(1)}$

Применение метода симметричных составляющих, предложенного в подгл. 2.1, рассматривается на примере однофазного металлического КЗ (рис. 2.2). Предполагается, что замыкание произошло в фазе А, т. к. общепринято фазу А всегда ставить в особые условия.

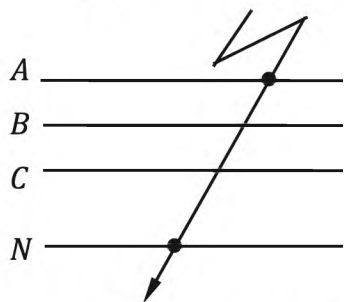


Рис. 2.2. Однофазное КЗ на землю

Граничные условия, т. е. условия КЗ, можно записать как

$$\dot{i}_{KB}^{(1)} = \dot{i}_{KC}^{(1)} = 0, \quad \dot{U}_{KA}^{(1)} = 0. \quad (2.5)$$

В точку КЗ ток поступает только из поврежденной фазы, следовательно, в неповрежденных фазах нет тока КЗ, и напряжения в фазах В и С не равны нулю. В соответ-

ствии с выражениями (2.1), (2.2) и (2.5) граничные условия для фазы A могут быть представлены в виде (нижний индекс «к» для симметричных составляющих опускается для упрощения выражений):

$$\dot{U}_{кA}^{(1)} = \dot{U}_{A0}^{(1)} + \dot{U}_{A1}^{(1)} + \dot{U}_{A2}^{(1)},$$

$$i_{A0}^{(1)} = i_{A1}^{(1)} = i_{A2}^{(1)} = \frac{1}{3} i_{кA}^{(1)}.$$

Далее, подставив вместо $i_{A0}^{(1)}$ и $i_{A2}^{(1)}$ ток $i_{A1}^{(1)}$ и просуммировав раздельно левые и правые части уравнений Кирхгофа (2.4), получим

$$\begin{aligned} 0 &= \dot{E}_{1\Sigma}^{(1)} - i_{A1}^{(1)}(Z_{0\Sigma} + Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma}), \\ i_{A1}^{(1)} &= \frac{\dot{E}_{1\Sigma}^{(1)}}{Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma} + Z_{2\Sigma}} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}^{(1)}}{Z_{1\Sigma} + Z_{\Delta}^{(1)}}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

где $Z_{\Delta}^{(1)} = Z_{0\Sigma} + Z_{2\Sigma}$.

Ток в поврежденной фазе в месте замыкания будет

$$i_{кA}^{(1)} = 3i_{A1}^{(1)}. \quad (2.7)$$

Определим по формуле (2.4) ток и напряжение других последовательностей:

$$\begin{aligned} i_{A2}^{(1)} &= i_{A0}^{(1)} = i_{A1}^{(1)}, \\ \dot{U}_{A0}^{(1)} &= -Z_{0\Sigma} i_{A1}^{(1)} = -Z_{0\Sigma} i_{A0}^{(1)}, \\ \dot{U}_{A2}^{(1)} &= -Z_{2\Sigma} i_{A1}^{(1)} = -Z_{2\Sigma} i_{A2}^{(1)}, \\ \dot{U}_{A1}^{(1)} &= \dot{E}_{1\Sigma}^{(1)} - Z_{1\Sigma} i_{A1}^{(1)} = Z_{\Delta}^{(1)} i_{A1}^{(1)}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Если в схеме ЭС преобладают реактивные сопротивления, то можно принять $Z_{1\Sigma} = jx_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma} = jx_{2\Sigma}$, $Z_{0\Sigma} = jx_{0\Sigma}$. Соответствующие изменения произойдут и в выражениях (2.6)—(2.8).

Для чисто индуктивной схемы можно построить векторные диаграммы токов и напряжений (рис. 2.3). Чтобы получить напряжения в фазах, достаточно воспользоваться преобразованием (2.2).

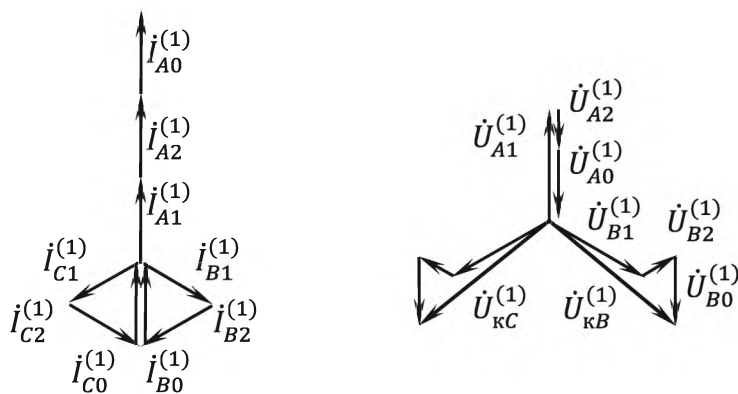


Рис. 2.3. Векторные диаграммы токов и напряжений при металлическом однофазном КЗ

Следует обратить особое внимание на выражение (2.8), которое отражает важнейшее свойство тока прямой последовательности.

Правило эквивалентности тока прямой последовательности

Ток прямой последовательности для любого вида однократной несимметрии определяется аналогично току трехфазного КЗ с учетом дополнительного сопротивления $Z_{\Delta}^{(n)}$, которое определяется только результирующими сопротивлениями обратной и нулевой последовательности относительно расчетной точки КЗ.

При расчетах тока и напряжения для различных видов несимметрии величина $Z_{\Delta}^{(n)}$ определяется по приведенным ниже выражениям.

Вид несимметрии	$Z_{\Delta}^{(n)}$
$K^{(1)}$	$Z_{0\Sigma} + Z_{2\Sigma}$
$K^{(1,1)}$	$(Z_{0\Sigma}^{-1} + Z_{2\Sigma}^{-1})^{-1}$
$K^{(2)}$	$Z_{2\Sigma}$
$L^{(1)}$	$(Z_{0\Sigma}^{-1} + Z_{2\Sigma}^{-1})^{-1}$
$L^{(1,1)}$	$Z_{0\Sigma} + Z_{2\Sigma}$

Примечание. $L^{(1)}$ и $L^{(1,1)}$ — обрыв одной и двух фаз соответственно.

При увеличении сопротивления одной из фаз на величину Z , т. е. при несимметрии вида $L^{(Z)}$, величина

$$Z_{\Delta}^{(Z)} = (Z_{0\Sigma}^{-1} + Z_{2\Sigma}^{-1} + 3Z^{-1})^{-1}.$$

2.3. Параметры и схемы замещения элементов электрических систем для обратной и нулевой последовательности

Для анализа несимметричных режимов электрических установок пользуются методом симметричных составляющих. При этом для каждой последовательности составляется собственная схема замещения. При составлении схем замещения пользуются следующими правилами.

Параметры схем замещения обратной и нулевой последовательности определяются в зависимости от принадлежности элемента ЭС к одной из трех групп элементов:

- 1) элементы, у которых фазы не имеют электромагнитной связи между собой, $x_0 = x_1 = x_2$, $r_0 = r_1 = r_2$;
- 2) то же, имеют электромагнитную связь, неподвижные относительно друг друга, $x_1 = x_2$, $r_1 = r_2$. Сопротивление нулевой последовательности может значительно отличаться от сопротивления прямой последовательности;
- 3) то же, имеют электромагнитную связь и перемещаются относительно друг друга (коэффициенты связи — переменные величины) фазами. В этом случае сопротивления всех последовательностей различны.

Синхронные машины. Токи обратной последовательности текут в обмотках СМ, если к зажимам подключить источник напряжения обратной последовательности. Магнитный поток, возникающий при этом, вызовет в статоре нечетные гармоники тока. Картина протекания тока обратного следования фаз будет определяться конкретным видом КЗ, внешним сопротивлением и другими системными факторами. Иными словами, индуктивность обратной последовательности зависит от внешних условий работы. Рассмотрим несколько случаев.

Напряжение обратной последовательности, подведенное от источника бесконечной мощности. В статоре СМ помимо основной гармоники возникает третья гармоника поля. Сопротивление x_2 (обратной последовательности) может быть определено из схемы замещения, соответствующей рис. 2.4, а, с учетом третьей гармоники тока прямой последовательности, которая вызвана потоком обратной последовательности синхронной частоты.

$$x_2 = \frac{\dot{U}_{2(\omega)}}{\dot{I}_{2(\omega)}} = \frac{2x_d''x_q''}{x_d'' + x_q''}. \quad (2.9)$$

Источник напряжения обратной последовательности бесконечной мощности, расположенный не на зажимах статора, а за дополнительным внешним сопротивлением x . В таком случае сопротивление всей цепи составляет

$$x_{2\Sigma} = \frac{2(x_d'' + x)(x_q'' + x)}{x_d'' + x_q'' + 2x}.$$

На долю непосредственно СМ придется сопротивление

$$x_2 = x_{2\Sigma} - x = \frac{2x_d''x_q'' + x(x_d'' + x_q'')}{x_d'' + x_q'' + 2x},$$

которое в явной форме зависит от внешних условий. В реальных ЭС достаточно часто встречается ситуация, когда СМ значительно удалены от точки КЗ. Это значит, что приближенно можно считать $x \rightarrow \infty$:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} x_2 = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2x_d''x_q'' + x(x_d'' + x_q'')}{x_d'' + x_q'' + 2x} = \frac{x_d'' + x_q''}{2}.$$

Последнее выражение соответствует схеме на рис. 2.4, б. Здесь третья гармоника тока отсутствует.

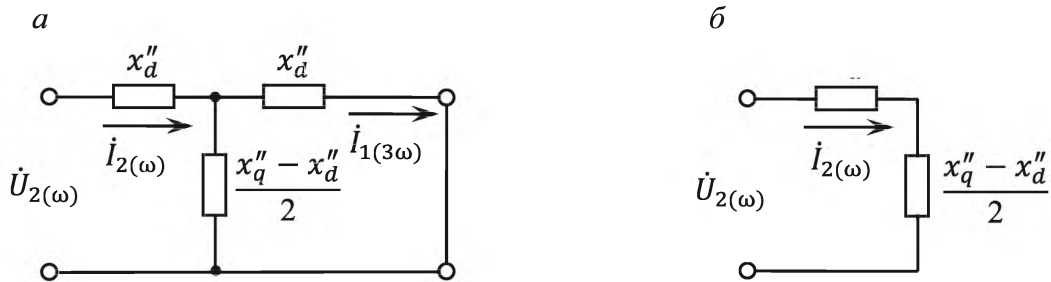


Рис. 2.4. Схема замещения для определения x_2 СМ при питании от источника бесконечной мощности: а – расположенного на зажимах статорной обмотки; б – удаленного

Напряжение обратной последовательности, подведенное от источника конечной мощности. В статоре СМ будет присутствовать полный спектр нечетных гармоник поля. Схема замещения будет бесконечной (рис. 2.5). Результирующее сопротивление схемы составит

$$x_2 = \sqrt{x_d''x_q''}.$$

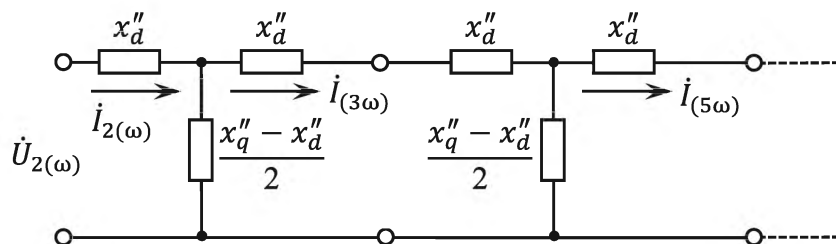


Рис. 2.5. Схема замещения для определения x_2 СМ при питании от источника конечной мощности

Если рассматривать СМ с симметричным ротором ($x_d'' = x_q''$), то во всех вариантах получим $x_2 = x_d''$. При расчетах, проводимых без учета демпферных обмоток, в полученные выражения следует подставить x_d' вместо x_d'' и x_q вместо x_q'' .

В расчетах для СМ без демпферных обмоток рекомендуется принимать $x_2 = 1,45x_d'$, для СМ с демпферными обмотками $x_2 = 1,22x_d''$. Упрощенно можно считать, что $x_2 \approx x_d''$ (есть демпферные обмотки) и $x_2 \approx x_d'$ (демпферные обмотки отсутствуют), если место возникновения несимметричного режима удалено от зажимов синхронной машины, $x \neq 0$.

Токи нулевой последовательности потекут в СМ только в том случае, если нейтраль заземлена. Обычно статорная обмотка собирается в звезду с заземленной нейтралью. При протекании по фазам обмотки токов нулевой последовательности создаются одинаковые по величине и совпадающие во времени магнитные потоки. Поскольку фазные обмотки статора сдвинуты в пространстве на 120° , то результирующий поток в расточке машины можно считать равным нулю. Значит, сопротивление нулевой последовательности СМ определяется лишь полями рассеяния, которые зависят от конструктивных особенностей обмоток, и колеблется в широких пределах

$$x_0 = (0,19 \div 0,6)x_d''.$$

Асинхронные машины. Предположим, что в нормальном режиме асинхронный двигатель (АД) работает со скольжением s_H . По отношению к магнитному потоку обратного следования фаз этот режим будет характеризоваться скольжением $s = 2 - s_H$. Следовательно, сопротивление x_2 для АД можно определить как сопротивление при $s = 2 - s_H$.

Зависимость на рис. 2.6 иллюстрирует примерный характер изменения относительного сопротивления АД в функции скольжения. С увеличением s сопротивление резко уменьшается, а затем остается практически неизменным. Отмеченное свойство позволяет с достаточной степенью точности считать, что $x_{д(s=1)} \approx x_{д(s=2-s_H)}$. Следовательно, сопротивление обратной последовательности равно пусковому сопротивлению АД

$$x_2 = x_{д(s=1)} = x_{\text{пуск}} = \frac{U_H}{I_{\text{пуск}}}.$$

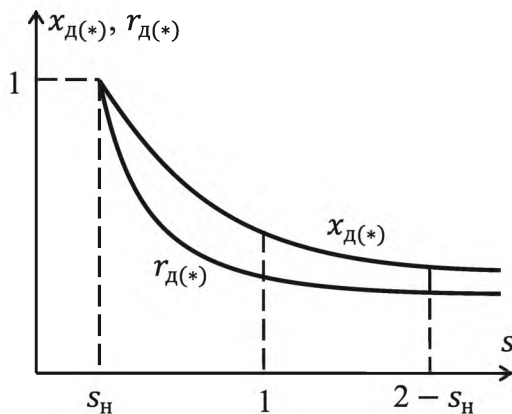


Рис. 2.6. Относительное изменение сопротивлений АД

Реактивное сопротивление АД нулевой последовательности определяется конструкцией обмоток. Поэтому у различных двигателей, как и у СМ, величины x_0 резко отличаются. Численное значение параметра либо берется из паспортных данных, либо получается экспериментальным путем.

Комплексная нагрузка. В крупные узлы нагрузки электрической сети обычно входят различные виды потребителей, поэтому сопротивление обратной последовательности обобщенной нагрузки зависит от структуры приемников электроэнергии, их характеристик (табл. 2.1).

В упрощенных расчетах рекомендуется использовать следующие величины сопротивления обратной последовательности обобщенной нагрузки:

- для узлов с напряжением 6–10 кВ $Z_{2(*)} = 0,18 + j \cdot 0,24$;
- то же, 35 кВ $Z_{2(*)} = 0,14 + j \cdot 0,36$.

Если активное сопротивление в расчете не учитывается, то соответственно напряжению используются значения $x_{2(*)} = 0,35$ о. е. и $x_{2(*)} = 0,45$ о. е.

При решении студентами задач с заданным типом комплексной нагрузки рекомендуется использовать данные, приведенные в табл. 2.1 [5].

Таблица 2.1

Параметры элементов комплексной нагрузки

Потребители комплексной нагрузки	Значение эквивалентной ЭДС, о. е.	$\cos \varphi$	Сопротивление, о. е.	
			прямой последовательности	обратной последовательности
СД напряжением выше 1 кВ	1,074	0,9	$0,04 + j \cdot 0,15$	$0,04 + j \cdot 0,15$
« « до 1 кВ	1,079	0,9	$0,03 + j \cdot 0,16$	$0,03 + j \cdot 0,16$
АД напряжением свыше 1 кВ	0,93	0,87	$0,01 + j \cdot 0,17$	$0,01 + j \cdot 0,17$
АД напряжением до 1 кВ	0,9	0,8	$0,07 + j \cdot 0,18$	$0,07 + j \cdot 0,18$
Лампы накаливания	0	1	1,0	1,33
Газоразрядные источники света	0	0,85	$0,85 + j \cdot 0,53$	$0,382 + j \cdot 0,24$
Преобразователи	0	0,9	$0,9 + j \cdot 0,45$	$1,66 + j \cdot 0,81$
Электротермические установки	0	0,9	$1,0 + j \cdot 0,49$	$0,4 + j \cdot 0,2$

Сопротивление нулевой последовательности обобщенной нагрузки в первую очередь определяется трансформаторами. Схемы соединения их обмоток обычно таковы, что токи нулевой последовательности в нагрузку не попадают.

Трансформаторы и автотрансформаторы. Обмотки трансформаторов имеют электромагнитную связь, но все контуры неподвижны. Следовательно, для этих элементов выполняется условие $Z_1 = Z_2$. Особенности схем замещения трансформаторов и автотрансформаторов относительно токов нулевой последовательности обусловлены их зависимостью от схем соединения обмоток, а значения параметров — их зависимостью от конструктивного выполнения трансформаторов (автотрансформаторов). Для протекания токов нулевой последовательности в обмотке трансформатора (автотрансформатора) при появлении на ее выводах напряжения нулевой последовательности относительно земли (рассматривается трехпроводная система) необходимо, чтобы эта обмотка имела заземленную нейтраль. Сопротивление нулевой последовательности трансформатора со стороны обмотки, соединенной в треугольник или звезду с изолированной нейтралью, бесконечно велико. Рассмотрим некото-

рые варианты соединения обмоток трансформаторов и соответствующие им схемы замещения токам нулевой последовательности.

Первичная обмотка силового понижающего трансформатора обычно соединяется в звезду с заземленной нейтралью, вторичная — в треугольник. Пусть несимметрия возникла с первичной стороны (рис. 2.7, *а*). Магнитные оси первичных фазных обмоток, соединенные в звезду, не имеют пространственного сдвига, поэтому три тока по всем трем фазам протекают в нейтраль, где суммируются. При этом забираемая трансформатором мощность расходуется на намагничивание $x_{\mu 0}$ и передается во вторичную обмотку. Так как вторичные фазные обмотки соединены в треугольник, их магнитные оси сдвинуты в пространстве на угол 120° , следовательно, и токи, индуцируемые в обмотке II, оказываются сдвинутыми на тот же угол. Замыкаясь в треугольник, равные по значению токи в сумме дают ноль. Это условие в однолинейной схеме замещения аналогично закорачиванию сопротивления x_{II} (рис. 2.7, *б*). В остальную часть схемы токи из соединения треугольником не вытекают.

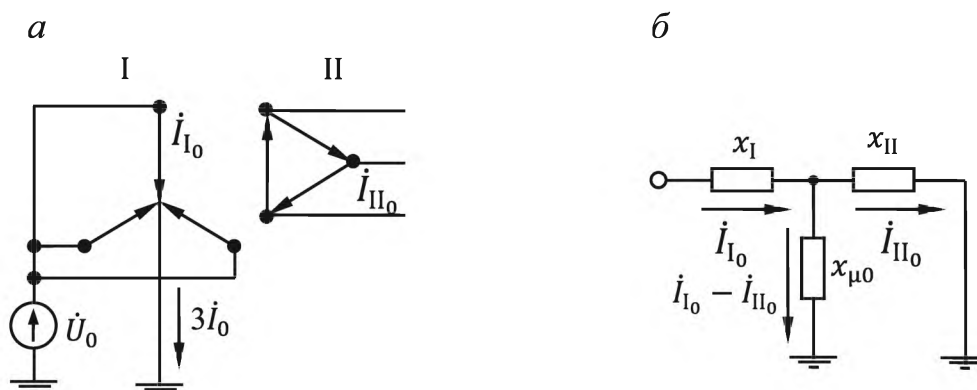


Рис. 2.7. Схема соединения обмоток трансформатора звездой–треугольником (*а*) и схема замещения при несимметрии со стороны первичной обмотки (*б*)

Следует добавить, что в обмотке I ток будет протекать только при выполнении двух условий: во-первых, цепь для \dot{I}_{I0} должна быть замкнута через заземленную нейтраль; во-вторых, токи должны протекать либо по обмотке II, либо в цепи намагничивания (через $x_{\mu 0}$).

Рассмотрим прежнюю схему соединения, но возьмем точку несимметрии со стороны обмотки II (рис. 2.8). Так как напряжения, приложенные к зажимам обмоток II, совпадают по значению и фазе, токи в обмотках не потекут. Следовательно, трансформатор в этом случае обладает бесконечно большим сопротивлением.

Иногда нейтрали трансформаторов заземляют через реактор либо через резистор, в этом случае данный элемент должен входить в состав контура, по которому протекают токи нулевой последовательности, следовательно, он должен быть учтен в схеме замещения. Если реактор включен в нейтраль двух- или трехобмоточного трансформатора, то он и все три фазы первичной обмотки по отношению к токам нулевой последовательности включены последовательно, $\dot{I}_N = 3\dot{I}_{I_0}$. Поскольку падение напряжения в сопротивлении элемента x_N при протекании токов нулевой последовательности всех трех фаз будет в три раза больше, чем от тока одной фазы, то в схеме замещения нулевой последовательности указанный элемент включается последовательно с первичной обмоткой I и учитывается утроенным сопротивлением (рис. 2.9):

$$x_0 = x_I + 3x_N + \left(\frac{1}{x_{II}} + \frac{1}{x_{\mu 0}} \right)^{-1}.$$

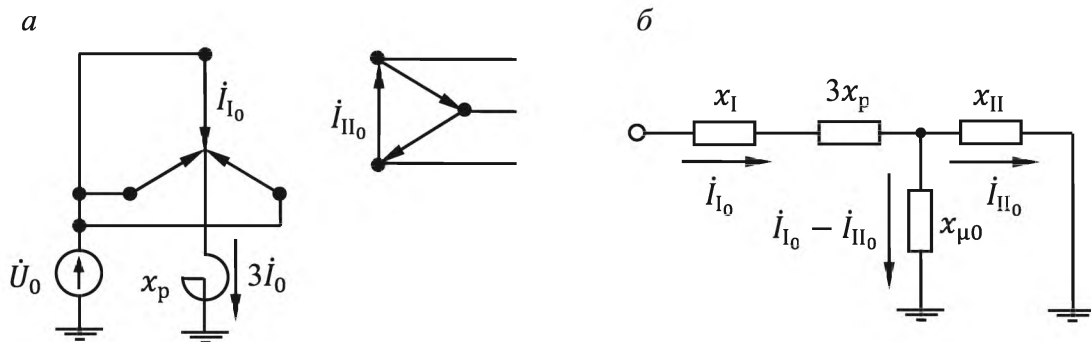


Рис. 2.9. Схемы соединения обмоток (а) и замещения трансформатора при заземлении нейтрали через реактор (б)

Теперь рассмотрим вариант, когда первичная и вторичная обмотки соединены по схеме «звезда–звезда» с заземленными нейтральными. Предположим, что несимметрия возникла со стороны обмотки I (рис. 2.10). Ток \dot{I}_{II_0} будет протекать только в том случае, если обеспечены условия протекания тока в остальной части ЭС, т. е. $x_{0C} \neq \infty$. В противном случае схема замещения разрывается в точке А.

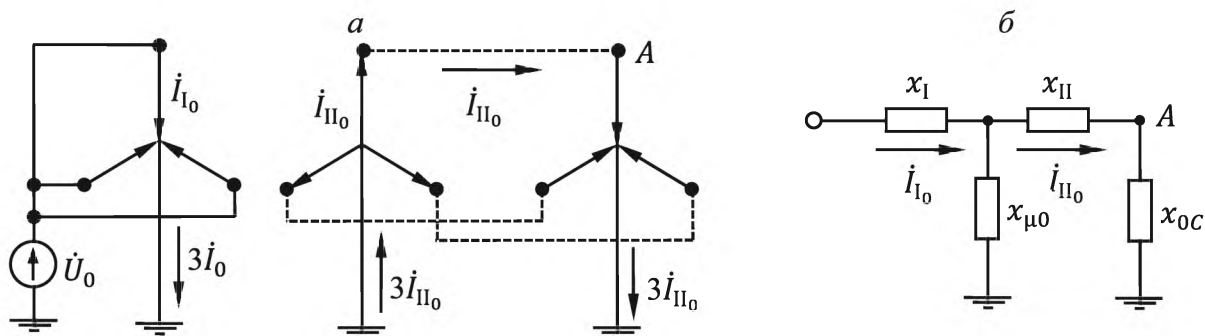


Рис. 2.10. Схема соединения обмоток звездой–звездой с нулевым проводом (а) и схема замещения трансформатора (б)

Коренное отличие автотрансформаторов от трансформаторов — наличие электрической связи между первичной и вторичной обмотками. Выпускаются автотрансформаторы с тремя обмотками, причем нейтраль первичной и вторичной обмотки глухо заземлена, а обмотка III соединена в треугольник (рис. 2.11, а). Схема замещения будет такой же, как у трехобмоточного трансформатора (рис. 2.11, б), однако ток в нейтрали $i_N = 3(i_{I0} - i_{II0})$ и токи i_{I0} , i_{II0} вычисляются каждый на своей ступени напряжения.

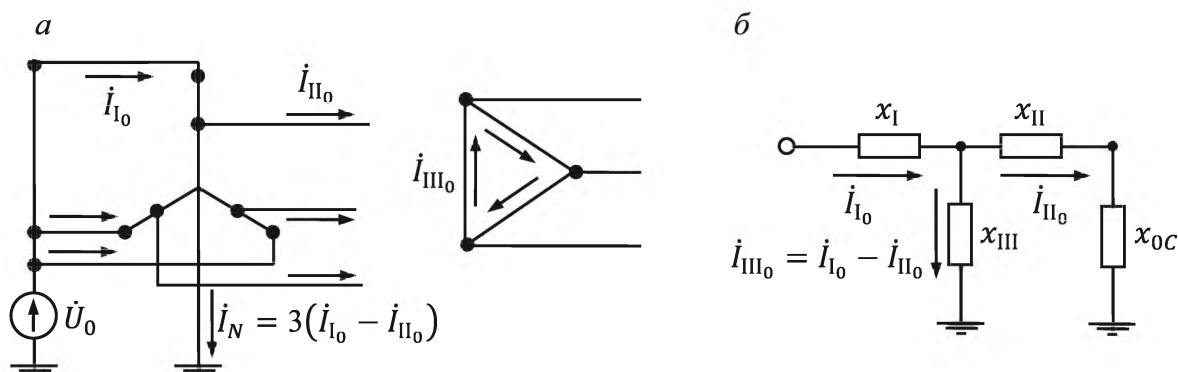


Рис. 2.11. Схема соединения обмоток (а) и схема замещения автотрансформатора (б)

При заземлении нейтрали автотрансформатора через реактор сопротивления нулевой последовательности такого автотрансформатора с учетом параметров реактора зависит не только от сопротивлений реактора, но и от номинальных напряжений высшей и средней обмоток. Сопротивления схемы замещения нулевой последовательности автотрансформатора при заземлении нейтрали через сопротивление рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned}x'_I &= x_I + 3x_N(1 - n); \\x'_{II} &= x_{II} + 3x_N(1 - n)n; \\x'_{III} &= x_{III} + 3x_Nn; \\n &= U_{I \text{ ном}}/U_{II \text{ ном}},\end{aligned}$$

где x_I, x_{II}, x_{III} — сопротивления обмоток автотрансформатора, приведенные к напряжению $U_{I \text{ ном}}$; x_N — сопротивление в нейтрали.

Воздушные линии электропередачи. Воздушные линии (ВЛ) — элементы с постоянными коэффициентами связи, т. е. $Z_1 = Z_2$.

Сопротивление нулевой последовательности ВЛ зависит от пути протекания тока нулевой последовательности. Поскольку три вектора тока в фазах совпадают по значению и направлению, то для их замыкания нужен еще один проводник. Им может быть любой попутный проводник: земля, рельсы, тросы и т. п. Из-за отсутствия фазового сдвига между названными векторами влияние на сопротивление нулевой последовательности взаимоиндукции соседних фаз и параллельных цепей оказывается значительным.

Учет влияния земли основан на том, что распределение тока в земле подчиняется закону, аналогичному закону растекания тока в массивных проводниках. Представим однопроводную линию переменного тока с обратным проводом в виде земли (рис. 2.12). Индуктивность такой линии может быть определена как индуктивность некоторой двухпроводной линии с расстоянием пролегания второго провода D_3 . Это расстояние носит название эквивалентной глубины возврата тока через землю и определяется по формуле

$$D_3 = \frac{2,085 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{f\lambda \cdot 10^{-7}}}, \quad (2.10)$$

где f — частота, Гц; λ — удельная проводимость земли, $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$.

Значение величины D_3 колеблется в пределах от 90 м (сухая земля) до 3000 м (морская вода). Для зоны Урала D_3 — 935 м. Поскольку $h \ll D_3$, то h обычно не учитывается. Индуктивное сопротивление такой линии

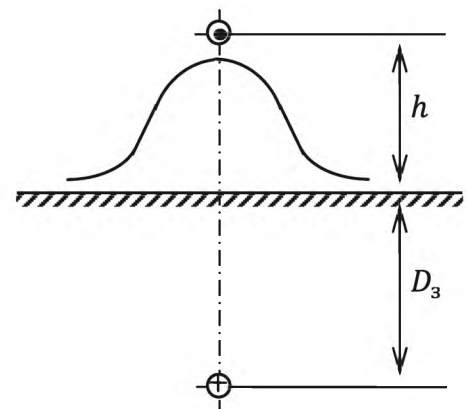


Рис. 2.12. Однопроводная линия «провод–земля»

можно вычислить по формуле

$$x_L = 0,145 \lg \frac{D_3}{R_3},$$

где R_3 — эквивалентный радиус провода, зависит от конструкции, материала и вычисляется относительно истинного радиуса R по приведенным ниже данным.

Коэффициенты для расчета эквивалентного радиуса:

Для витых медных проводников..... $R_3 = (0,724 \div 0,771)R$

Для алюминиевых и сталеалюминевых
проводов марок А, АС, АСО, АСУ..... $R_3 = (0,85 \div 0,95)R$

Если ВЛ выполнена с расщепленными проводами, то вводится среднегеометрический радиус $R_{cp} = \sqrt[m]{R_3 \prod_{i=2}^m a_{1i}}$, где m — количество проводов в фазе; a_{1i} — расстояние между первым и i -м проводами.

Активное сопротивление r зависит не только от сопротивления провода r_n , но и от активного сопротивления земли r_3 : $r = r_n + r_3$.

Сопротивление земли определяется по величине потерь активной мощности в земле. При $f = 50$ Гц активное сопротивление земли равно

$$r_3 = \pi^2 f \cdot 10^{-4} = 0,05 \text{ Ом/км} \quad (2.11)$$

и зависит от частоты переменного тока, но не зависит от проводимости.

Степень влияния фаз друг на друга для трехфазной линии с полным циклом транспозиции проводов учитывается сопротивлением взаимной индукции. Это сопротивление между фазами определяется при возврате тока через землю в соответствии с выражением

$$z_M = r_3 + j \cdot 0,145 \lg \left(\frac{D_3}{D_{cp}} \right),$$

где D_{cp} — среднегеометрическое расстояние между проводами, $D_{cp} = \sqrt[3]{d_{AB} d_{BC} d_{CA}}$. Здесь d_{AB} , d_{BC} , d_{CA} — истинные расстояния между проводами. В связи с тем что токи нулевой последовательности во всех трех фазах совпадают, полное сопротивление трехфазной ВЛ токам нулевой последовательности равно

$$z_0 = z_L + z_M + z_M = r_{\text{пр}} + 3r_3 + j \cdot 0,435 \lg \left(\frac{D_3}{\sqrt[3]{D_{\text{ср}}^2 R_3}} \right). \quad (2.12)$$

Известно, что сопротивление ВЛ току прямой последовательности составляет

$$z_1 = r_{\text{пр}} + j \cdot 0,1445 \lg \left(\frac{D_{\text{ср}}}{R_3} \right). \quad (2.13)$$

Сравнивая формулы (2.12) и (2.13), легко сделать вывод, что сопротивление нулевой последовательности ВЛ всегда превосходит сопротивление прямой последовательности.

Наличие параллельных цепей еще больше увеличивает сопротивление нулевой последовательности ВЛ. Рассмотрим двухцепную ВЛ, у которой обе цепи подключены к общим шинам (рис. 2.13).

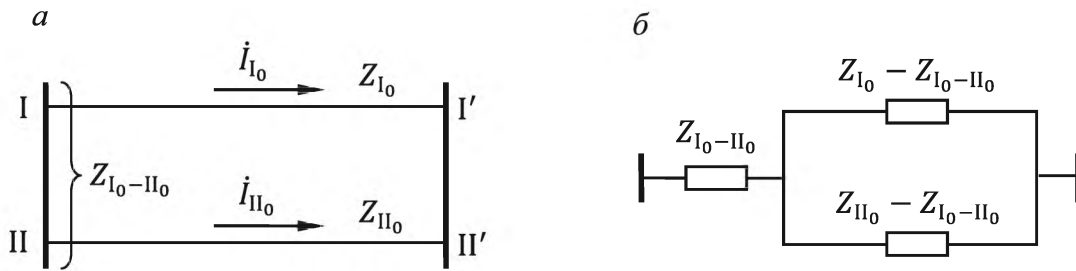


Рис. 2.13. Двухцепная ВЛ:
а – схема соединения; б – схема замещения

Параметры схемы замещения вычисляются так:

$$z_{I_0-II_0} = 3 \left(r_3 + j \cdot 0,145 \lg \frac{D_3}{D_{I-II_0}} \right), \quad (2.14)$$

$$D_{I-II_{\text{ср}}} = \sqrt[9]{d_{AA}d_{AB}d_{AC}d_{BA}d_{BB}d_{BC}d_{CA}d_{CB}d_{CC}}, \quad (2.15)$$

где $D_{I-II_{\text{ср}}}$ — среднегеометрическое расстояние между фазами; $d_{AA}-d_{CC}$ — действительное расстояние между фазами.

Эту же схему замещения можно использовать, если к одним шинам подключен только один конец цепей. Если оба конца подключены к разным шинам, приходится использовать схему замещения в виде четырехугольника (рис. 2.14) с параметрами

$$z_{ij} = f(z_{I_0}, z_{II_0}, z_{(I-II)_0}).$$

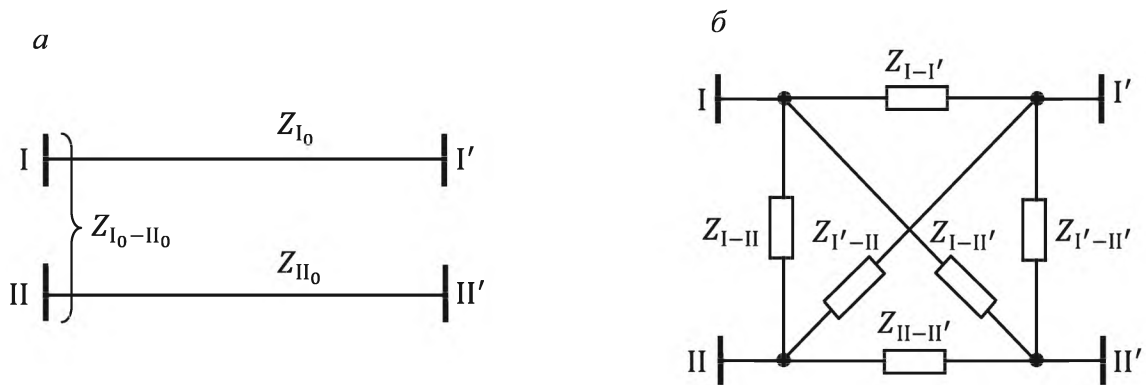


Рис. 2.14. Двухцепная ВЛ:

a – при подключении цепей к различным шинам; *б* – схема замещения

Учет влияния тросов возможен по методике, подобной методике учета параллельных цепей. Тросы используются как средства грозозащиты и поэтому должны обеспечивать замкнутый контур для волны перенапряжений. В связи с этим тросы либо заземляются на каждой опоре, либо их подвешивают на изоляторах и заземляют с одной стороны. С другой стороны трос подключается к земле через разрядник.

По заземленному грозозащитному тросу ВЛ в несимметричном режиме потечет ток $I_T = 3I_{T_0}$ (см. схему на рис. 2.15). Если подсчитать эквивалентное сопротивление для нулевой последовательности, получим

$$z_0^{п-т} = z_{л_0} - z_{пт_0} + \frac{z_{пт_0}(z_{т_0} - z_{пт_0})}{z_{т_0}} = z_{л_0} - \frac{z_{пт_0}^2}{z_{т_0}}. \quad (2.16)$$

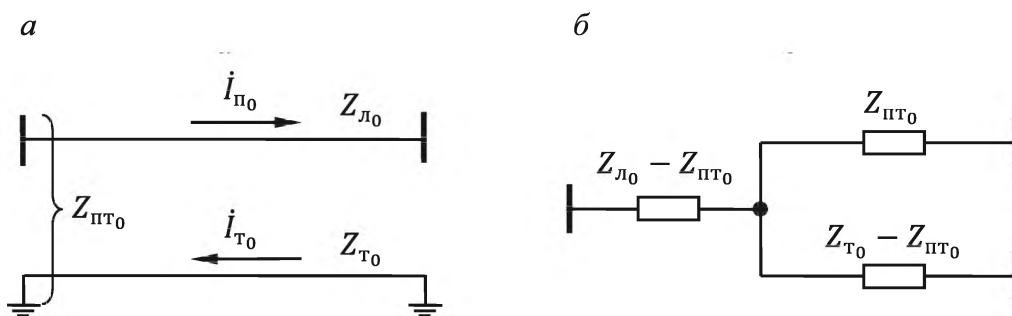


Рис. 2.15. Одноцепная линия с заземленным тросом:

a – схема; *б* – схема замещения

Из выражения (2.16) следует, что наличие заземленного троса снижает сопротивление нулевой последовательности ВЛ. Величина влияния зависит от типа троса: стальной, плохо проводящий, хорошо проводящий.

Для упрощенных практических расчетов можно использовать коэффициент $k = x_0/x_1$, который имеет следующие приближенные значения:

Одноцепная линия без троса	3,5
То же, со стальным тросом.....	3,0
« « с хорошо проводящим тросом.....	2,0
Двухцепная линия без троса.....	5,5
То же, со стальным тросом.....	4,2
« « с хорошо проводящим тросом	3,0

Кабельные линии. Сопротивления прямой и обратной последовательности равны $Z_1 = Z_2$. Значительное влияние на эквивалентное сопротивление может оказать только сопротивление нулевой последовательности. Кабельные линии прокладывают на небольшой глубине, поэтому при определении параметров можно использовать те же принципы, что и для ВЛ. Оболочка кабеля, как правило, заземлена по его концам и в ряде промежуточных точек, поэтому влияние оболочки кабеля на сопротивление нулевой последовательности напоминает влияние троса ВЛ. Однако распределение тока между оболочкой и землей зависит от таких условий, как качество прокладки кабеля, сопротивление заземлений, параметры оболочки кабеля и т. п., поэтому получение достоверного значения сопротивления нулевой последовательности достаточно затруднено. В ориентировочных практических расчетах можно принять

$$r_0 = 10r_1, x_0 \approx (3,5 \div 4,6)x_1.$$

2.4. Составление схем замещения различных последовательностей

При анализе несимметричного режима методом симметричных составляющих необходимо составить три независимых схемы замещения в соответствии со следующими правилами.

Схемы замещения прямой и обратной последовательности

Схема замещения элементов ЭС прямой последовательности, включая схемы замещения генераторных и нагрузочных узлов, такая же, как и при симметричном трехфазном КЗ

Пути протекания токов обратной последовательности аналогичны путям протекания токов прямой последовательности, поэтому

структурно схема замещения обратной последовательности повторяет схему замещения прямой последовательности. Исключение составляют генераторные и нагрузочные узлы, сопротивления которых считаются постоянными по величине. ЭДС обратной последовательности всех генераторных узлов условно считаются равными нулю. Началом обеих схем замещения считается точка нулевого потенциала, которая объединяет свободные концы генераторных и нагрузочных ветвей. Конец схемы — точка несимметрии, причем при продольной несимметрии имеется две точки конца. Поскольку в точке несимметрии в переходном режиме имеется остаточное напряжение, которое можно разложить на симметричные составляющие, то в конечных точках схем замещения для поперечной несимметрии подключаются напряжения \dot{U}_{A1} или \dot{U}_{A2} , для продольной — $\Delta\dot{U}_{A1}$ или \dot{U}_{A2} .

При определенных условиях для практических расчетов допускается считать $Z_{1\Sigma} \approx Z_{2\Sigma}$.

Схема замещения нулевой последовательности. В силу особенности протекания токов нулевой последовательности схема замещения нулевой последовательности существенно отличается от схемы замещения прямой последовательности. Различие главным образом определяется схемами замещения ВЛ и трансформаторов. Параметры всех элементов считаются постоянными, ЭДС нулевой последовательности принимается равной нулю. В зависимости от вида точки несимметрии в нее подключается \dot{U}_{A0} или $\Delta\dot{U}_{A0}$.

Составление схемы нулевой последовательности начинается от точки несимметрии по тем путям, по которым протекание токов возможно, т. е. учитываются ветви, у которых имеется хотя бы одна заземленная нейтраль. При продольной несимметрии протекание токов нулевой последовательности возможно не только по нейтралям, но и по контурам, параллельным источнику $\Delta\dot{U}_{A0}$.

Началом схемы считается точка нулевого потенциала, концом — точка несимметрии. Если продольная несимметрия возникла в сети с изолированными нейтралями, то понятие «начало схемы» теряет смысл, поскольку точка нулевого потенциала будет перемещаться в зависимости от режима.

Эквивалентные схемы замещения. После составления схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательности, приведения параметров к одному классу напряжения, последовательного их эквивалентирования получают три схемы (рис. 2.16).

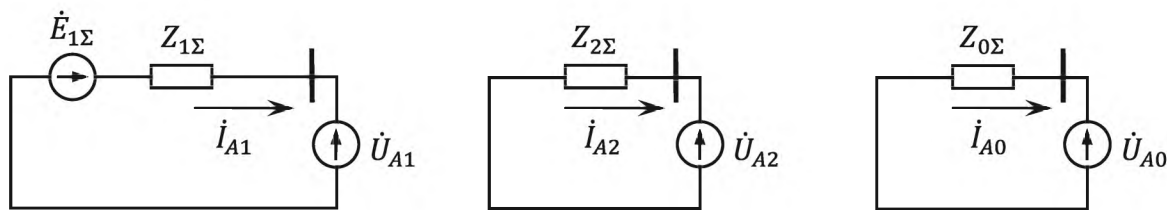


Рис. 2.16. Эквиваленты схем последовательностей

В соответствии с тем или иным видом несимметрии строятся универсальные схемы замещения, которые позволяют найти составляющие токов и напряжений различных последовательностей (рис. 2.17).

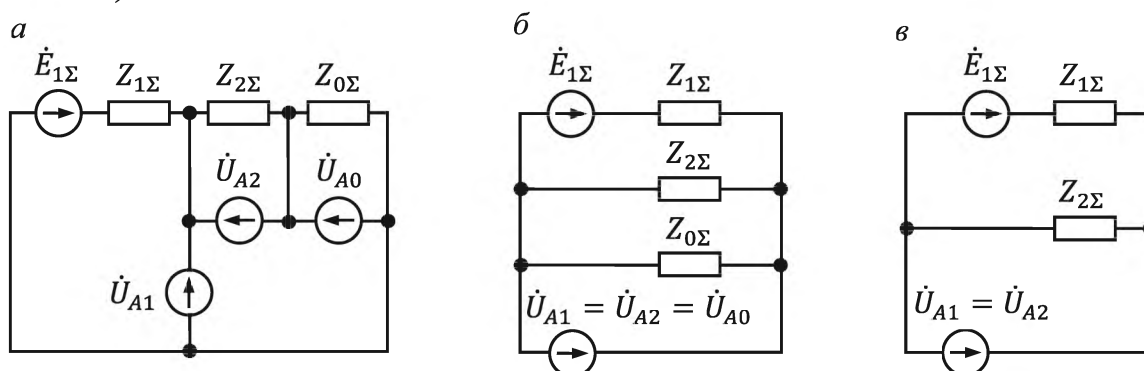


Рис. 2.17. Эквивалентные схемы замещения для однофазного $K^{(1)}$ (а), двухфазного на землю $K^{(1,1)}$ (б), междуфазного $K^{(2)}$ (в) КЗ

2.5. Практические методы расчета режимов электрических систем с однократной несимметрией

В практических расчетах несимметричных режимов используются те же допущения, что и при анализе симметричного трехфазного КЗ. При несимметричных замыканиях в электрических сетях ток содержит высшие гармонические составляющие, появляющиеся вследствие несимметрии роторов синхронных машин, трехфазных трехобмоточных трансформаторов и других элементов ЭС. Если этими гармоническими составляющими пренебречь, то появляется возможность применения метода симметричных составляющих. Помимо этого, поскольку результирующее эквивалентное индуктивное сопротивление расчетной схемы относительно точки КЗ обычно значительно превышает результирующее активное сопротивление, расчет тока при несимметричных КЗ можно проводить, не учитывая актив-

ные сопротивления. После составления схем замещения последовательностей вычисляются эквивалентные параметры и далее на основе правила эквивалентности прямой последовательности — ток прямой последовательности по формуле (2.9) для начального момента времени $t = 0$. Определение апериодической составляющей тока КЗ производится по аналогии с $K^{(3)}$, но зависит от вида несимметрии, а активные и реактивные сопротивления определяются по выражениям

$$x_{\Sigma}^{(n)} = x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)};$$

$$r_{\Sigma}^{(n)} = r_{1\Sigma} + r_{\Delta}^{(n)}.$$

Определение токов и напряжений других последовательностей осуществляется по формулам, получаемым из универсальной схемы соединения последовательностей (см. рис. 2.17). Поскольку напряжения при несимметричном КЗ в узлах ЭС выше, чем при $K^{(3)}$, то уровень подпитки нагрузкой снижается, поэтому желательно учитывать только нагрузку, подключенную к точке КЗ.

При несимметричных процессах фазные токи и напряжения находятся как сумма соответствующих составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности. Для определения модуля результирующего тока КЗ поврежденной фазы достаточно найденный ток прямой последовательности увеличить в $m^{(n)}$ раз (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Определение симметричных составляющих токов и напряжений при несимметричных КЗ

Определяемые величины	Вид несимметричного КЗ		
	Двухфазное $K^{(2)}$	Однофазное $K^{(1)}$	Двухфазное на землю $K^{(1,1)}$
$i_{\text{KA}1}$	$\frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(2)})}$	$\frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(1)})}$	$\frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(1,1)})}$
$x_{\Delta}^{(n)}$	$x_{2\Sigma}$	$x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$	$x_{2\Sigma} \parallel x_{0\Sigma}$
$i_{\text{KA}2}$	$-i_{\text{KA}1}$	$i_{\text{KA}1}$	$-\frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} i_{\text{KA}1}$
$i_{\text{KA}0}$	0	$i_{\text{KA}1}$	$-\frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} i_{\text{KA}1}$

Определяемые величины	Вид несимметричного КЗ		
	Двухфазное $K^{(2)}$	Однофазное $K^{(1)}$	Двухфазное на землю $K^{(1,1)}$
$\Delta \dot{U}_{\text{KA1}}$	$jx_{\Delta}^{(2)} i_{\text{KA1}}$	$jx_{\Delta}^{(1)} i_{\text{KA1}}$	$jx_{\Delta}^{(1,1)} i_{\text{KA1}}$
$\Delta \dot{U}_{\text{KA2}}$	$\Delta \dot{U}_{\text{KA1}}$	$-jx_{2\Sigma} i_{\text{KA1}}$	$\Delta \dot{U}_{\text{KA1}}$
$\Delta \dot{U}_{\text{KA0}}$	0	$-jx_{0\Sigma} i_{\text{KA1}}$	$\Delta \dot{U}_{\text{KA1}}$
$m^{(n)}$	$\sqrt{3}$	3	$\sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}$

Учет изменения во времени тока несимметричного КЗ. Известно, что ток прямой последовательности в точке КЗ определяется, как ток трехфазного КЗ, но за дополнительным сопротивлением $Z_{\Delta}^{(n)}$ или $x_{\Delta}^{(n)}$. Это сопротивление вычисляется путем параллельно-последовательного включения эквивалентных сопротивлений обратной $Z_{2\Sigma}$ и нулевой $Z_{0\Sigma}$ последовательности исследуемой ЭС. Таким образом, сопротивление $Z_{\Delta}^{(n)}$ остается неизменным во времени, а закон изменения тока прямой последовательности полностью определяется функциями $Z_{1\Sigma}(t)$ и $E_{1\Sigma}(t)$, как при $K^{(3)}$. Следовательно, методы, применимые к расчету изменения тока $I_{\text{kt}}^{(3)}$ во времени, применимы к расчету $I_{\text{A1}}^{(n)}$.

Приближенные аналитические расчеты тока КЗ от синхронной машины в произвольный момент времени при несимметричных коротких замыканиях выполняются с использованием метода типовых кривых. При этом электрическую удаленность расчетной точки КЗ от синхронной машины оценивают относительно значения тока прямой последовательности, как в формуле (1.14 со с. 39), и искомое значение периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины в заданный момент времени равно

$$I_{\text{пт}} = m^{(n)} \gamma_t I_{\text{KA1}}^{(n)}.$$

Токи и напряжения остальных последовательностей определяются из уже известных соотношений для любого момента времени как функции тока прямой последовательности. Зная симметричные составляющие, легко вычислить токи и напряжения в фазах.

Распределение токов и напряжений по элементам ЭС. Для того чтобы определить величины токов в ветвях и напряжений в узлах ЭС в несимметричном режиме, нужно знать соответствующие им симметричные составляющие, т. е. получить распределение токов и напряжений в схемах соответствующих им симметричных составляющих. Поскольку токи и напряжения в точке несимметрии вычисляются достаточно просто, постольку для момента времени $t = 0$ распределение токов и напряжений может быть получено обычным образом, т. к. параметры схем последовательностей известны. Таким же путем получается распределение для токов и напряжений обратной и нулевой последовательностей в произвольный момент времени. В данном случае можно использовать метод коэффициентов токораспределения.

Для нахождения фазных величин за трансформаторами необходимо помнить, что токи и напряжения при переходе через трансформатор изменяются не только по значению, но и по фазе в зависимости от соединения его обмоток.

При переходе через трансформатор с четной группой соединений можно считать, что векторы симметричных составляющих токов и напряжений не изменяются по фазе.

При переходе через трансформатор с нечетной группой соединений со стороны звезды на треугольник векторы симметричных составляющих прямой последовательности смещаются на угол, равный $-30^\circ N$, обратной последовательности — на угол, равный $+30^\circ N$, где N — номер группы соединения. Другими словами, если известны напряжения прямой \dot{U}_{A1} , обратной \dot{U}_{A2} и нулевой \dot{U}_{A0} последовательности со стороны обмотки λ , то после трансформатора

$$\dot{U}_{a1} = \dot{U}_{A1} \cdot n \angle(-30^\circ N), \quad \dot{U}_{a2} = \dot{U}_{A2} \cdot n \angle(30^\circ N), \quad (2.17)$$

где $n = U_\Delta / U_\lambda$. Токи нулевой последовательности за обмоткой трансформатора, соединенной в треугольник, отсутствуют. На рис. 2.18 представлено смещение по фазе векторов напряжений прямой и обратной последовательностей при переходе через транс-

форматор с соединением обмоток $\lambda_0/\Delta-11$. Пример того, как протекают фазные токи за трансформаторами с различными группами соединения обмоток и в зависимости от вида несимметричного КЗ, показан на рис. 2.19.

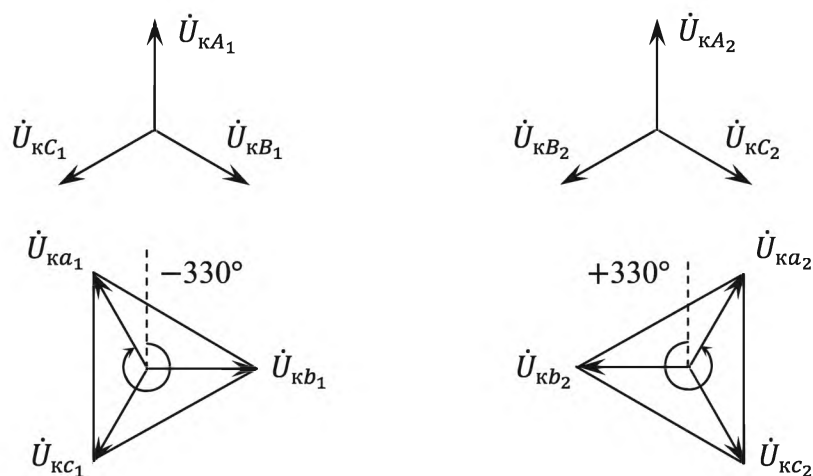
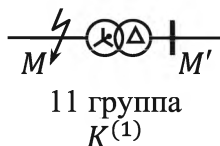


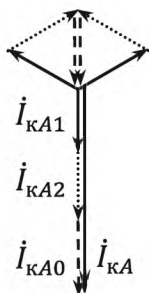
Рис. 2.18. Смещение по фазе напряжений прямой и обратной последовательности в трансформаторе с соединением обмоток $\lambda_0/\Delta-11$

a

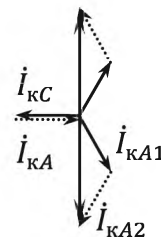
Трансформатор



Векторная диаграмма токов в точке M

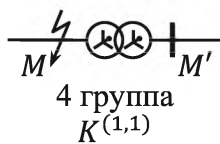


Векторная диаграмма токов в точке M'

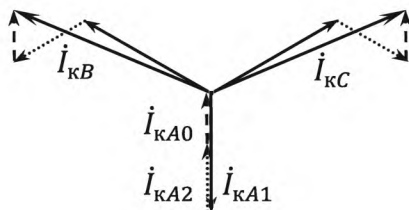


б

Трансформатор



Векторная диаграмма токов в точке M



Векторная диаграмма токов в точке M'

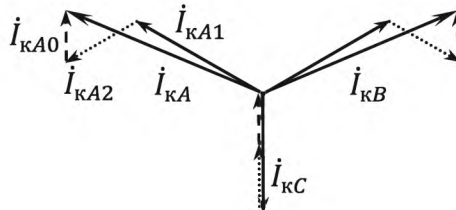


Рис. 2.19. Пример трансформации токов прямой, обратной и нулевой последовательности в зависимости от группы соединения обмоток и вида несимметрии:

a – однофазное КЗ на землю, $K^{(1)}$; *б* – двухфазное КЗ на землю, $K^{(1,1)}$

2.6. Сравнение различных видов несимметричных коротких замыканий

Предположим, что КЗ различных видов происходят поочередно в одной и той же точке ЭС и при одинаковых начальных условиях. Тогда на основании анализа универсальной схемы соединения последовательностей и табл. 2.2 можно записать

$$Z_{\Delta}^{(3)} < Z_{\Delta}^{(1,1)} < Z_{\Delta}^{(2)} < Z_{\Delta}^{(1)};$$

$$I_{A1}^{(3)} > I_{A1}^{(1,1)} > I_{A1}^{(2)} > I_{A1}^{(1)}.$$

Следовательно,

$$U_{A1}^{(3)} < U_{A1}^{(1,1)} < U_{A1}^{(2)} < U_{A1}^{(1)}.$$

Постоянные времени затухания апериодической составляющей тока КЗ от генератора с демпферными обмотками определяются по выражению

$$\tau_a \approx T'_d = T_f \frac{x'_{d\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}}{x_{d\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}},$$

откуда вытекают неравенства

$$T'_d{}^{(1)} > T'_d{}^{(2)} > T'_d{}^{(1,1)} > T'_d{}^{(3)}.$$

Следовательно, апериодическая составляющая наиболее быстро затухает при трехфазном КЗ.

Как известно, увеличение внешнего сопротивления $x_{\Delta}^{(n)}$ приводит к замедлению работы АРВ у СМ. Однако в несимметричных режимах снижение напряжения за счет сопротивления $Z_{\Delta}^{(n)}$ меньше, чем при $K^{(3)}$. В результате процесс восстановления напряжения происходит быстрее, чем при КЗ $K^{(3)}$. Таким образом, чем больше дополнительная индуктивность $x_{\Delta}^{(n)}$, тем медленнее протекает переходный процесс в СМ, но быстрее восстанавливается нормальный режим по напряжению.

Коэффициент $m^{(n)} = |i_K^{(n)}| / |i_{K1}^{(n)}|$, определяющий соотношение токов (см. табл. 2.2), позволяет оценить диапазон изменения токов различных КЗ по отношению к $K^{(3)}$. Пусть

$$K_{(n-3)} = \frac{i_k^{(n)}}{i_k^{(3)}} = m^{(n)} \frac{i_{k1}^{(n)}}{i_k^{(3)}} = m^{(n)} \frac{1}{1 + Z_{\Delta}^{(n)} / Z_{1\Sigma}}.$$

Предположим, что возникло металлическое КЗ $K^{(1)}$ на зажимах СМ с заземленной нейтралью. Сопротивление $Z_{0\Sigma}$ в этом случае пренебрежимо мало, а соотношение между $Z_{1\Sigma}$ и $Z_{2\Sigma}$ зависит от текущего времени t . Если принять $t = 0$, то $Z_{2\Sigma} \approx x_{2\Sigma} \approx x_d''$, $x_{2\Sigma}/x_{1\Sigma} = 1$, т. е. $K_{(1-3)} = 3/2$. Если принять $t = \infty$, то $x_{2\Sigma} \approx x_d''$, $x_{1\Sigma} \approx x_d$, $x_{2\Sigma}/x_{1\Sigma} \approx 0$ и $K_{(1-3)} = 3$. Для случая изолированной нейтрали — $K_{(1-3)} = 0$.

Отдалим КЗ, тогда $x_{1\Sigma} \approx x_{2\Sigma}$ и $K_{(1-3)} = 3/(2 + x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma})$. Характер изменения коэффициента $K_{(1-3)}$ при увеличении соотношения $x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma}$ приведен на рис. 2.20.

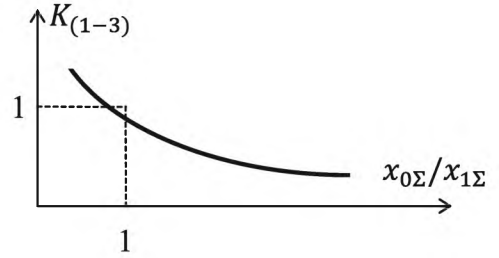


Рис. 2.20. Характер изменения соотношения $K_{(1-3)}$

$$K_{(1,1-3)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma}x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}} \cdot 1 / \left(1 + \frac{x_{2\Sigma}x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})x_{1\Sigma}}\right).$$

Предположим, что КЗ отдалено. Если $x_{0\Sigma} \rightarrow 0$, то $K_{(1,1-3)} = \sqrt{3}$. При изменении $x_{0\Sigma} \rightarrow \infty$, $K_{(1,1-3)} = \sqrt{3}/2$, следовательно, диапазон изменения коэффициента $K_{(1,1-3)}$.

$$\sqrt{3}/2 \leq K_{(1,1-3)} \leq \sqrt{3}.$$

Пределы изменения $K_{(2-3)}$ получаются те же, что и для $K_{(1,1-3)}$.

Для практического применения интерес представляет также соотношение между токами в земле при $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$:

$$K_3 = \frac{|i_3^{(1)}|}{|i_3^{(1,1)}|} = \frac{x_{1\Sigma}x_{2\Sigma} + x_{1\Sigma}x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma}x_{0\Sigma}}{x_{1\Sigma}x_{2\Sigma} + x_{2\Sigma}x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma}^2}.$$

Предположим, что КЗ отдалено, и примем $x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma}$, тогда

$$K_3 = \frac{1 + 2x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma}}{2 + x_{0\Sigma}/x_{1\Sigma}}.$$

Устремляя поочередно $x_{0\Sigma}$ к 0 и ∞ , получим соответственно $K_3 = 1/2$ и $K_3 = 2$. Очевидно, что величина соотношения определяется сопротивлениями $x_{1\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$. Значения токов $i_3^{(1)}$ и $i_3^{(1,1)}$ будут равны при $x_{1\Sigma} = x_{0\Sigma}$.

2.7. Однократная продольная несимметрия

Наиболее часто встречается два вида продольной несимметрии — разрыв одной фазы или разрыв двух фаз в одном и том же месте (рис. 2.21, а, в). Также при неодновременном расхождении контактов полюсов выключателя может возникнуть дуга отключаемого тока, причем не во всех фазах цепи. В этом случае надо рассматривать продольную несимметрию от включения дополнительного сопротивления Z , которое располагается в точке разрыва (рис. 2.21, б, г).

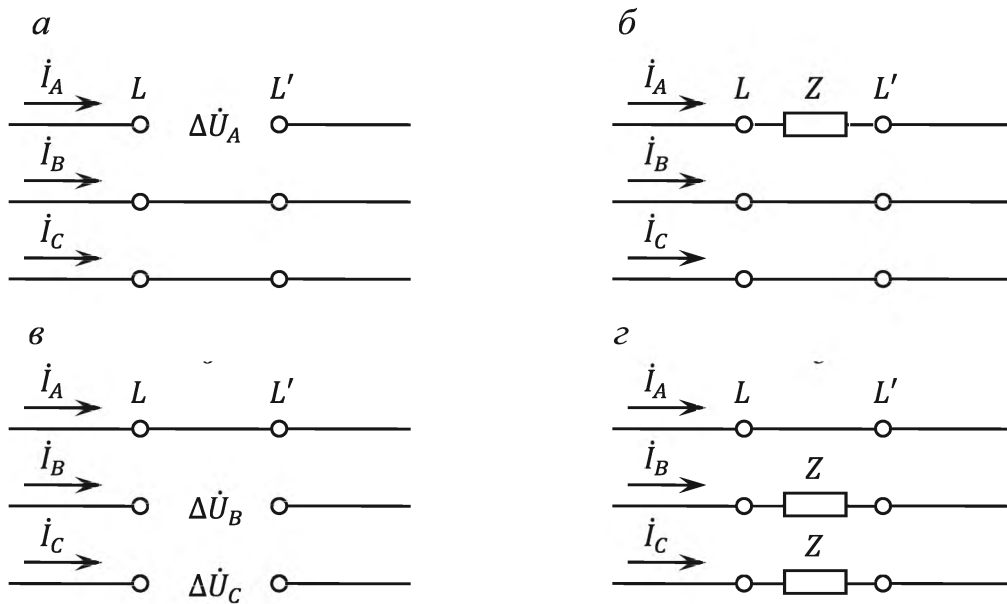


Рис. 2.21. Однократная продольная несимметрия в электрической сети:

а — обрыв в одной фазе $L^{(1)}$; б — включение сопротивления в одну фазу $L_z^{(1)}$;
в — обрыв в двух фазах $L^{(2)}$; г — включение сопротивления в две фазы $L_z^{(2)}$

Так же как и для любого несимметричного режима, при продольной несимметрии для нахождения режимных параметров используют метод симметричных составляющих.

Уравнения падений напряжений в схемах каждой последовательности, составляемые для симметричной части схемы, аналогичны уравнениям системы для поперечной несимметрии:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{U}_{LA_1} &= E_{1\Sigma} - z_{L_{1\Sigma}}\dot{I}_{LA_1}; \\ \Delta\dot{U}_{LA_2} &= -z_{L_{2\Sigma}}\dot{I}_{LA_2}; \\ \Delta\dot{U}_{LA_0} &= -z_{L_{0\Sigma}}\dot{I}_{LA_0},\end{aligned}$$

где $\Delta\dot{U}_{LA_1}$, $\Delta\dot{U}_{LA_2}$, $\Delta\dot{U}_{LA_0}$ — симметричные составляющие падений напряжений в фазе A на несимметричном участке системы; $E_{1\Sigma}$ — фазное значение суммарной ЭДС прямой последовательности относительно точки несимметрии; z_{L_Σ} — результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно места продольной несимметрии.

Дополнительная связь между симметричными составляющими токов и напряжений легко устанавливается из граничных условий рассматриваемой продольной несимметрии подобно тому, как это имело место при поперечной несимметрии.

Рассмотрим обрыв одной фазы $L^{(1)}$ (рис. 2.21, a). В качестве граничных условий можно записать $\dot{I}_{LA}^{(L^{(1)})} = 0$ (поскольку ток в поврежденной фазе протекать не может), $\Delta\dot{U}_B^{(L^{(1)})} = 0$, $\Delta\dot{U}_C^{(L^{(1)})} = 0$. При разложении на симметричные составляющие, опуская верхний индекс, определяющий вид несимметрии, получим

$$\Delta\dot{U}_{LA_1} = \Delta\dot{U}_{LA_2} = \Delta\dot{U}_{LA_0} = \frac{1}{3}\Delta\dot{U}_{LA}.$$

В таком случае

$$\dot{I}_{LA_2} = -\Delta\dot{U}_{LA_1}/z_{L_{2\Sigma}}, \quad \dot{I}_{LA_0} = -\Delta\dot{U}_{LA_1}/z_{L_{0\Sigma}}, \quad \dot{I}_{LA_1} + \dot{I}_{LA_2} + \dot{I}_{LA_0} = 0.$$

Для симметричных составляющих

$$\Delta\dot{U}_{LA_1} = z_{\Delta L}^{(L^{(1)})}\dot{I}_{LA_1}, \quad z_{\Delta L}^{(L^{(1)})} = z_{L_{2\Sigma}} \parallel z_{L_{0\Sigma}}.$$

Ток прямой последовательности фазы A в месте разрыва равен

$$\dot{I}_{LA_1} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{z_{L_{1\Sigma}} + z_{\Delta L}^{(L^{(1)})}},$$

а токи обратной и нулевой последовательности

$$\dot{I}_{LA_2} = -\frac{Z_{L_{0\Sigma}}}{Z_{L_{2\Sigma}} + Z_{L_{0\Sigma}}} \dot{I}_{LA_1},$$

$$\dot{I}_{LA_0} = -\frac{Z_{L_{2\Sigma}}}{Z_{L_{2\Sigma}} + Z_{L_{0\Sigma}}} \dot{I}_{LA_1}.$$

Расчетные формулы для определения симметричных составляющих токов и падений напряжений в месте однократной продольной несимметрии представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Расчетные формулы для продольной несимметрии

Определяемые величины	При обрыве		При включении дополнительного Сопротивления	
	одной фазы $L^{(1)}$	двух фаз $L^{(2)}$	в одну фазу $L_z^{(1)}$	в две фазы $L_z^{(2)}$
\dot{I}_{LA_1}	$\frac{E_{1\Sigma}}{Z_{L_{1\Sigma}} + Z_{\Delta L}^{(1)}}$	$\frac{E_{1\Sigma}}{Z_{L_{1\Sigma}} + Z_{\Delta L}^{(2)}}$	$\frac{E_{1\Sigma}}{Z_{L_{1\Sigma}} + Z_{\Delta L}^{(z1)}}$	$\frac{E_{1\Sigma}}{Z_{L_{1\Sigma}} + Z_{\Delta L}^{(z2)}}$
$Z_{\Delta L}^{(i)}$	$Z_{L_{2\Sigma}} \parallel Z_{L_{0\Sigma}}$	$Z_{L_{2\Sigma}} + Z_{L_{0\Sigma}}$	$\frac{Z}{3} \parallel Z_{L_{2\Sigma}} \parallel Z_{L_{0\Sigma}}$	$Z \parallel \parallel [(Z \parallel Z_{L_{2\Sigma}}) + (Z \parallel Z_{L_{0\Sigma}})]$
\dot{I}_{LA_2}	$-\frac{Z_{L_{0\Sigma}}}{Z_{L_{2\Sigma}} + Z_{L_{0\Sigma}}} \dot{I}_{LA_1}$	\dot{I}_{LA_1}	$-\frac{Z_{\Delta L}^{(z1)}}{Z_{L_{2\Sigma}}} \dot{I}_{LA_1}$	$\frac{-Z_{\Delta L}^{(z2)}}{Z + Z_{L_{2\Sigma}}} \dot{I}_{LA_1}$
\dot{I}_{LA_0}	$-\frac{Z_{L_{2\Sigma}}}{Z_{L_{2\Sigma}} + Z_{L_{0\Sigma}}} \dot{I}_{LA_1}$	\dot{I}_{LA_1}	$-\frac{Z_{\Delta L}^{(z1)}}{Z_{L_{0\Sigma}}} \dot{I}_{LA_1}$	$\frac{-Z_{\Delta L}^{(z2)}}{Z + Z_{L_{0\Sigma}}} \dot{I}_{LA_1}$
$\Delta \dot{U}_{LA_1}$	$Z_{\Delta L}^{(1)} \cdot \dot{I}_{LA_1}$	$Z_{\Delta L}^{(2)} \cdot \dot{I}_{LA_1}$	$Z_{\Delta L}^{(z1)} \cdot \dot{I}_{LA_1}$	$Z_{\Delta L}^{(z2)} \cdot \dot{I}_{LA_1}$
$\Delta \dot{U}_{LA_2}$	$\Delta \dot{U}_{LA_1}$	$-Z_{L_{2\Sigma}} \dot{I}_{LA_1}$	$\Delta \dot{U}_{LA_1}$	$\frac{Z_{L_{2\Sigma}} (Z - Z_{\Delta L}^{(z2)})}{Z + Z_{L_{2\Sigma}}} \dot{I}_{LA_1}$
$\Delta \dot{U}_{LA_0}$	$\Delta \dot{U}_{LA_1}$	$-Z_{L_{0\Sigma}} \dot{I}_{LA_1}$	$\Delta \dot{U}_{LA_1}$	$\frac{Z_{L_{0\Sigma}} (Z - Z_{\Delta L}^{(z2)})}{Z + Z_{L_{0\Sigma}}} \dot{I}_{LA_1}$

Вопросы для самопроверки

1. Каков алгоритм расчета фазных величин токов и напряжений в точке несимметрии?
2. Каковы основные допущения при расчетах несимметричных КЗ?
3. Каковы схемы соединения последовательностей при расчетах несимметричных КЗ?
4. Каковы схемы соединения последовательностей при расчетах режимов с продольной несимметрией?
5. Трансформация токов и напряжений различных последовательностей.
6. Каков принцип учета изменения во времени периодической составляющей тока несимметричного КЗ?

Расчетные примеры к главе 2

Пример 1

Для ЭС, схема которой изображена на рис. 2.22, составить схемы замещения и получить результирующие ЭДС и сопротивления для прямой, обратной и нулевой последовательности при возникновении поперечной или продольной несимметрии в точке M .

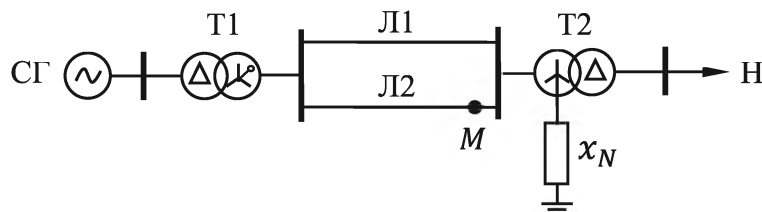


Рис. 2.22. Схема сети к примеру 1

Решение. Первоначально будем считать, что в точке M произошло некоторое несимметричное замыкание (случай поперечной несимметрии). Используя схемы замещения отдельных элементов, построим схему замещения прямой последовательности (рис. 2.23, а), уже с учетом приведения параметров к одной ступени напряжения — в схеме отсутствуют идеальные трансформаторы. В общем случае $E_{\Gamma}(t)$ и $x_{\Gamma}(t)$ — функции времени. Для момента времени $t = 0$, $E_{\Gamma} = E_{\Gamma}''$ и $x_{\Gamma} = x_{\Gamma}''$. Точкой H_1 на рис. 2.23, а обозначено начало схемы, K_1 — конец схемы. После преобразования получим эквивалентное сопротивление и эквивалентную ЭДС (рис. 2.23, б и формулы (2.18), (2.19)).

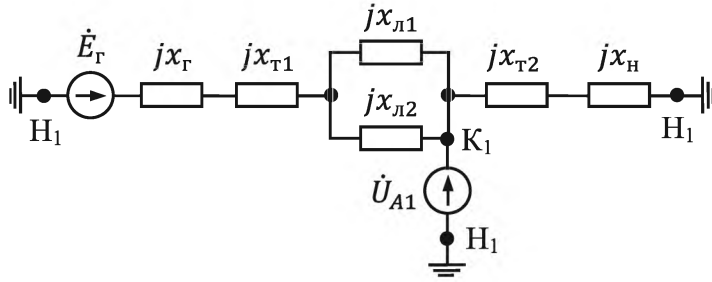
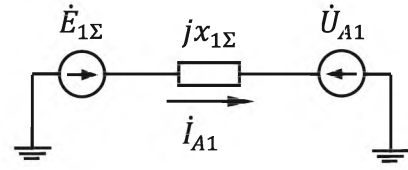
a*б*

Рис. 2.23. Прямая последовательность для варианта несимметричного КЗ:
a – схема замещения; *б* – эквивалентная схема

$$x_{1\Sigma} = \left(\left(x_r + x_{T1} + \frac{x_{L1}x_{L2}}{x_{L1}+x_{L2}} \right)^{-1} + (x_H + x_{T2})^{-1} \right)^{-1}. \quad (2.18)$$

$$\dot{E}_{1\Sigma} = \left[\frac{\dot{E}_r}{j \left(x_r + x_{T1} + \frac{x_{L1}x_{L2}}{x_{L1}+x_{L2}} \right)} + \frac{0}{j(x_H + x_{T2})} \right] jx_{1\Sigma}. \quad (2.19)$$

При составлении схемы замещения обратной последовательности (рис. 2.24, *a*) необходимо учесть, что для генератора и нагрузки сопротивление обратной последовательности отличается от сопротивления прямой. Если генератор достаточно далеко от точки КЗ, то отличием $x_{r(2)}$ от x_d'' можно пренебречь (см. п. 2.3 данного пособия). В результате преобразования получим эквивалентное сопротивление обратной последовательности (рис. 2.24, *б*):

$$x_{2\Sigma} = \left(\left(x_{r(2)} + x_{T1} + \frac{x_{L1}x_{L2}}{x_{L1}+x_{L2}} \right)^{-1} + (x_{T2} + x_{H(2)})^{-1} \right)^{-1}.$$

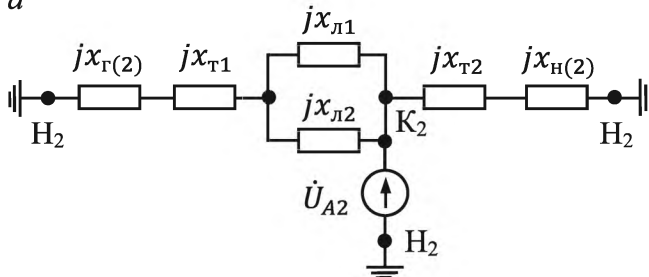
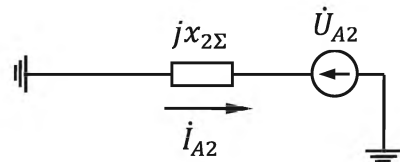
a*б*

Рис. 2.24. Обратная последовательность для варианта несимметричного КЗ:
a – схема замещения; *б* – эквивалентная схема

Схема замещения нулевой последовательности изображена на рис. 2.25, *а*, ее эквивалент — на рис. 2.25, *б*. При составлении схемы учитываются пути протекания токов нулевой последовательности, схемы соединения обмоток трансформаторов, наличие сопротивления в нейтрали трансформатора Т2, сопротивления линий 1 и 2, рассчитанные с учетом взаимоиндукции между цепями:

$$x_{0\Sigma} = \left(\left(x_{T1} + \frac{x_{L1(0)}x_{L2(0)}}{x_{L1(0)} + x_{L2(0)}} \right)^{-1} + (x_{T2} + 3x_N)^{-1} \right)^{-1},$$

где $x_{L1(0)} = x_{L10} + x_{1-2_0}$, $x_{L2(0)} = x_{L20} + x_{1-2_0}$. Здесь x_{L10} , x_{L20} — сопротивления линий 1 и 2 токам нулевой последовательности (рассчитываются по формуле (2.12) со с. 93); x_{1-2_0} — сопротивление взаимоиндукции между цепями линий, рассчитанное по формуле (2.14).

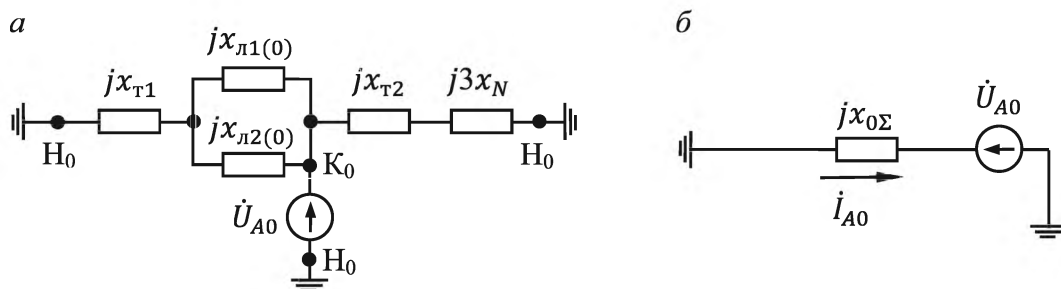


Рис. 2.25. Нулевая последовательность для варианта несимметричного КЗ:
а — схема замещения; *б* — эквивалентная схема

Предположим, что в точке *М* (см. рис. 2.22) возникла продольная несимметрия. Схема замещения прямой последовательности для этого случая изображена на рис. 2.26, *а*.

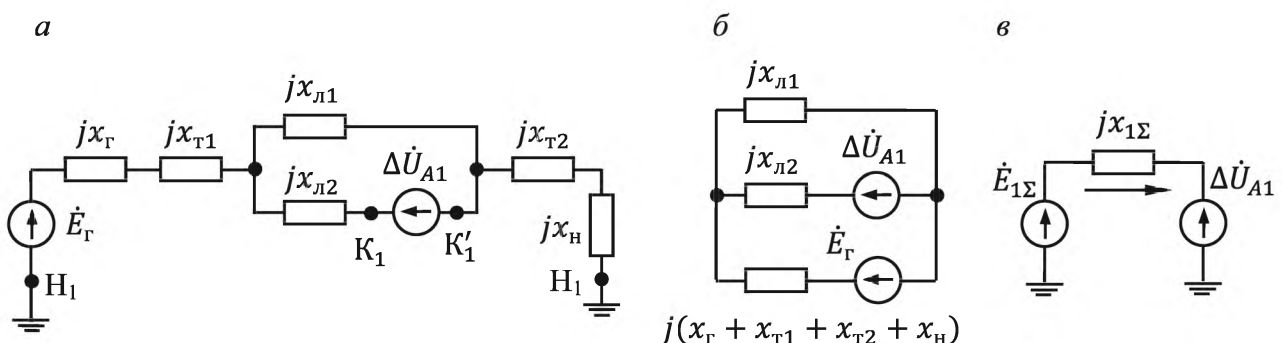


Рис. 2.26. Прямая последовательность для варианта продольной несимметрии:
а — схема замещения; *б* — преобразованная схема; *в* — эквивалентная схема

Для удобства преобразуем схему, как на рис. 2.26, *б*, а затем получим эквивалент (рис. 2.26, *в*) с параметрами

$$x_{1\Sigma} = x_{л2} + ((x_{л1})^{-1} + (x_{т2} + x_{н} + x_{г} + x_{т1})^{-1})^{-1};$$

$$\dot{E}_{1\Sigma} = \frac{E_{г}x_{л1} + 0(x_{т2} + x_{н} + x_{г} + x_{т1})}{x_{л1} + x_{т2} + x_{н} + x_{г} + x_{т1}}.$$

Для обратной последовательности предположим, что $x_{2\Sigma} = x_{1\Sigma}$.

Схема нулевой последовательности приведена на рис. 2.27, а. Здесь, поскольку линии находятся в разных условиях, используется трехлучевая схема замещения (как на рис. 2.13 со с. 93). Теперь можно получить промежуточную схему (рис. 2.27, б) и эквивалент (рис. 2.27, в):

$$x_{0\Sigma} = (x_{л2_0} - x_{1-2_0}) + \left(\frac{1}{x_{л1_0} - x_{1-2_0}} + \frac{1}{x_{т1} + x_{1-2_0} + 3x_{н} + x_{т2}} \right)^{-1}.$$

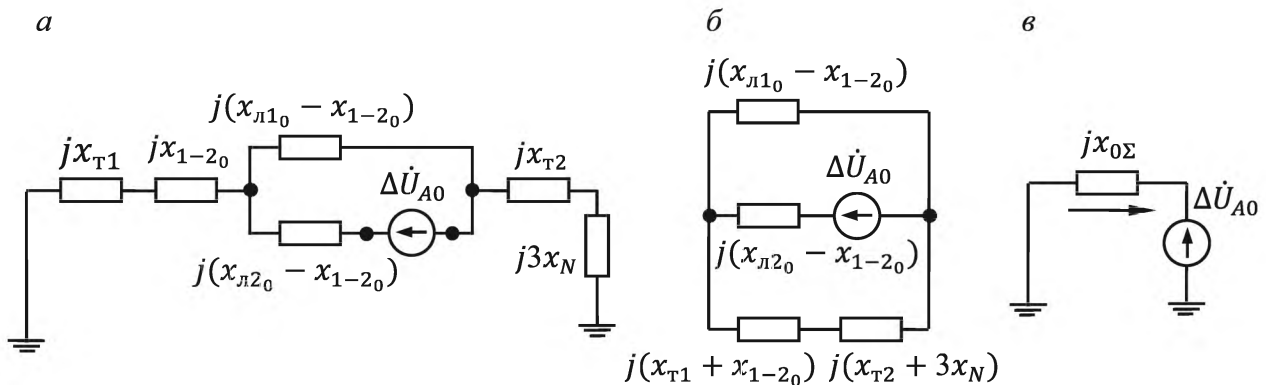


Рис. 2.27. Нулевая последовательность для варианта продольной несимметрии:

а – схема замещения; б – преобразованная схема; в – эквивалентная схема

Даже при разомкнутых нейтралях трансформаторов путь для тока нулевой последовательности сохранится через параллельную цепь ВЛ (рис. 2.27, б).

Пример 2

Для некоторой ЭС и случая поперечной несимметрии были получены эквивалентные схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательности, показанные на рис. 2.28. Определить токи и напряжения в месте КЗ в фазах для случаев $K^{(1)}$, $K^{(1,1)}$ и $K^{(2)}$.

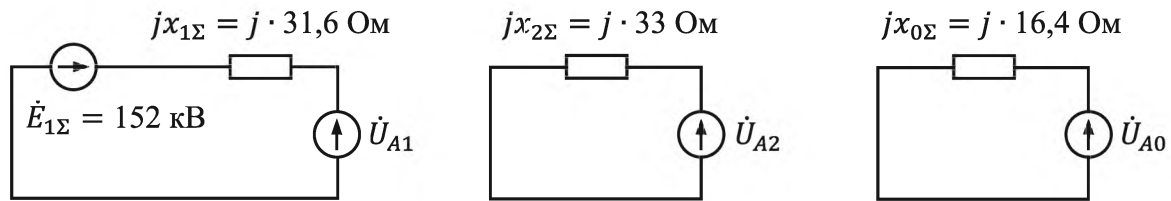


Рис. 2.28. Эквиваленты схем последовательностей

Решение. При анализе режимов используем схемы соединения последовательностей, изображенные на рис. 2.17 со с. 97.

Однофазное короткое замыкание на землю. В соответствии со схемой рис. 2.17, а запишем

$$x_{\Delta}^{(1)} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma} = 33 + 16,4 = 49,4 \text{ Ом};$$

$$i_{A1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(1)})} = \frac{152}{j \cdot (31,6 + 49,4)} = -j \cdot 1,88 \text{ кА},$$

тогда

$$i_{A2}^{(1)} = i_{A0}^{(1)} = i_{A1}^{(1)} = -j \cdot 1,88 \text{ кА};$$

$$\dot{U}_{A1}^{(1)} = i_{A1}^{(1)} \cdot jx_{\Delta}^{(1)} = (-j \cdot 1,88)(j \cdot 49,4) = 92,87 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{A2}^{(1)} = -i_{A2}^{(1)} \cdot jx_{2\Sigma} = (j \cdot 1,88)(j \cdot 33) = -62,07 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{A0}^{(1)} = -i_{A0}^{(1)} \cdot jx_{0\Sigma} = (j \cdot 1,88)(j \cdot 16,4) = -30,8 \text{ кВ}.$$

Фазные величины:

$$i_{\text{кА}}^{(1)} = i_{A0}^{(1)} + i_{A1}^{(1)} + i_{A2}^{(1)} = 3(-j \cdot 1,88) = -j \cdot 5,64 \text{ кА};$$

$$i_{\text{кВ}}^{(1)} = i_{A0}^{(1)} + a^2 i_{A1}^{(1)} + a i_{A2}^{(1)} = (1 + a^2 + a)i_{A1}^{(1)} = 0;$$

$$i_{\text{кС}}^{(1)} = 0;$$

$$\dot{U}_{\text{кА}}^{(1)} = \dot{U}_{A0}^{(1)} + \dot{U}_{A1}^{(1)} + \dot{U}_{A2}^{(1)} = -30,8 + 92,87 - 62,07 = 0;$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{KB}^{(1)} &= \dot{U}_{A0}^{(1)} + a^2 \dot{U}_{A1}^{(1)} + a \dot{U}_{A2}^{(1)} = \\ &= -30,8 + \left(-\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot 92,87 - \frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 62,07 = \\ &= -46,2 - j \cdot 134,2 = 141,9 \angle -108,9^\circ \text{ кВ};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{KC}^{(1)} &= \dot{U}_{A0}^{(1)} + a \dot{U}_{A1}^{(1)} + a^2 \dot{U}_{A2}^{(1)} = -30,8 + \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot 92,87 - \\ &- \left(-\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot 62,07 = -46,2 + j \cdot 134,2 = 141,9 \angle 108,9^\circ \text{ кВ}.\end{aligned}$$

Двухфазное замыкание на землю. Запишем в соответствии со схемой рис. 2.17, б

$$x_{\Delta}^{(1,1)} = \left(\frac{1}{x_{2\Sigma}} + \frac{1}{x_{0\Sigma}}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{33} + \frac{1}{16,4}\right)^{-1} = 10,96 \text{ Ом};$$

$$i_{A1}^{(1,1)} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(1,1)})} = \frac{152}{j \cdot (31,6 + 10,96)} = -j \cdot 3,57 \text{ кА};$$

$$\dot{U}_{A1}^{(1,1)} = i_{A1}^{(1,1)} \cdot j x_{\Delta}^{(1,1)} = (-j \cdot 3,57)(j \cdot 10,96) = 39,13 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{A2}^{(1,1)} = \dot{U}_{A0}^{(1,1)} = \dot{U}_{A1}^{(1,1)} = 39,13 \text{ кВ};$$

$$i_{A2}^{(1,1)} = \frac{-\dot{U}_{A2}^{(1,1)}}{x_{2\Sigma}} = \frac{-39,13}{j \cdot 33} = j \cdot 1,19 \text{ кА};$$

$$i_{A0}^{(1,1)} = \frac{-\dot{U}_{A0}^{(1,1)}}{x_{0\Sigma}} = \frac{-39,13}{j \cdot 16,4} = j \cdot 2,38 \text{ кА}.$$

Фазные величины:

$$i_{KA}^{(1,1)} = i_{A0}^{(1,1)} + i_{A1}^{(1,1)} + i_{A2}^{(1,1)} = j \cdot 2,38 - j \cdot 3,57 + j \cdot 1,19 = 0 \text{ кА};$$

$$\begin{aligned}i_{KB}^{(1,1)} &= i_{A0}^{(1,1)} + a^2 i_{A1}^{(1,1)} + a i_{A2}^{(1,1)} = j \cdot 2,38 + \left(-\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-j \cdot 3,57) + \\ &+ \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right)(j \cdot 1,19) = -4,12 + j \cdot 3,57 = 5,45 \angle 139,1^\circ \text{ кА};\end{aligned}$$

$$i_{\text{KC}}^{(1,1)} = i_{A0}^{(1,1)} + a i_{A1}^{(1,1)} + a^2 i_{A2}^{(1,1)} = j \cdot 2,38 + \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-j \cdot 3,57) + \\ + \left(-\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right)(j \cdot 1,19) = 4,12 + j \cdot 3,57 = 5,45 \angle 40,9^\circ \text{ кА.}$$

Напряжения:

$$\dot{U}_{\text{KA}}^{(1,1)} = \dot{U}_{A0}^{(1,1)} + \dot{U}_{A1}^{(1,1)} + \dot{U}_{A2}^{(1,1)} = 3 \cdot 39,13 = 117,4 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{\text{KB}}^{(1,1)} = \dot{U}_{\text{KC}}^{(1,1)} = 0 \text{ кВ.}$$

Межфазное замыкание. В соответствии со схемой рис. 2.17, в запишем

$$x_{\Delta}^{(2)} = x_{2\Sigma} = 33 \text{ Ом.}$$

$$i_{A1}^{(2)} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(2)})} = \frac{152}{j \cdot (31,6 + 33)} = -j \cdot 2,35 \text{ кА};$$

$$\dot{U}_{A1}^{(2)} = i_{A1}^{(2)} \cdot j x_{\Delta}^{(2)} = (-j \cdot 2,35)(j \cdot 33) = 77,6 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{A2}^{(2)} = \dot{U}_{A1}^{(2)} = 77,6 \text{ кВ};$$

$$i_{A2}^{(2)} = \frac{-\dot{U}_{A2}^{(2)}}{x_{2\Sigma}} = \frac{-77,6}{j \cdot 33} = j \cdot 2,35 = -i_{A1}^{(2)}.$$

Фазные величины:

$$i_A^{(2)} = 0;$$

$$i_{\text{KB}}^{(2)} = a^2 i_{A1}^{(2)} + a i_{A2}^{(2)} = \\ = \left(-\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-j \cdot 2,35) + \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right)(j \cdot 2,35) = -4,07 \text{ кА};$$

$$i_{\text{KC}}^{(2)} = -i_{\text{KB}}^{(2)} = 4,07 \text{ кА};$$

$$\dot{U}_{\text{KA}}^{(2)} = \dot{U}_{A1}^{(2)} + \dot{U}_{A2}^{(2)} = 77,6 \cdot 2 = 155,2 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{\kappa B}^{(2)} = \dot{U}_{\kappa C}^{(2)} = -77,6 \text{ кВ.}$$

Результаты расчетов приведены на рис. 2.29.

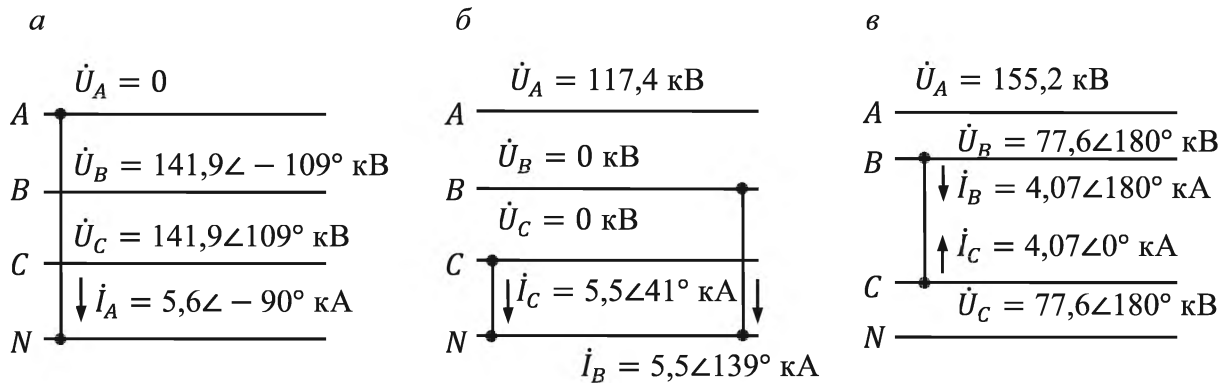


Рис. 2.29. Результаты расчетов фазных напряжений и токов для однофазного КЗ (а), двухфазного КЗ на землю (б), двухфазного межфазного КЗ (в)

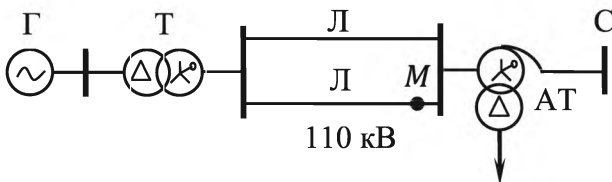


Рис. 2.30. Схема исследуемой ЭС

Пример 3

В ЭС, схема которой приведена на рис. 2.30, в точке М возникла продольная несимметрия. Эквиваленты схем замещения различных последовательностей, приведенные к напряжению 110 кВ,

изображены на рис. 2.31. Определить токи и напряжения в фазах в точке несимметрии для случаев обрыва одной и двух фаз и изменения сопротивления в одной фазе.

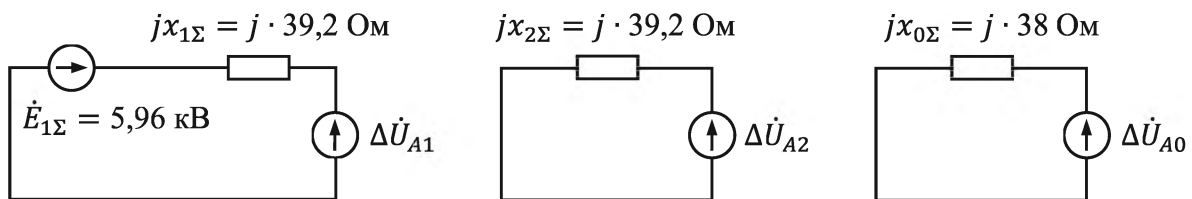


Рис. 2.31. Эквиваленты схем прямой, обратной и нулевой последовательности

Решение. При анализе режимов можно использовать схемы соединения последовательностей, сходные с рис. 2.17, составленные для случаев продольной несимметрии (рис. 2.32).

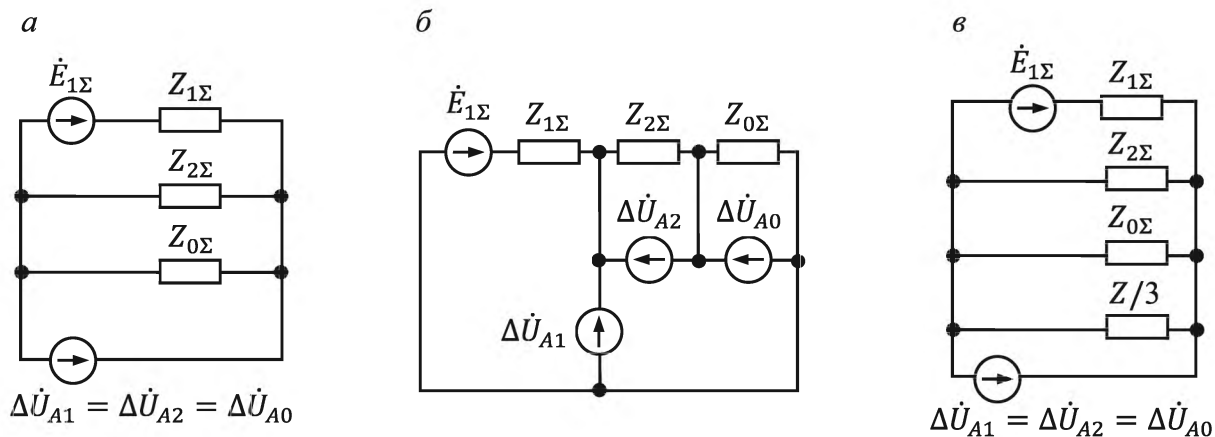


Рис. 2.32. Эквивалентные схемы замещения для обрыва одной фазы $L^{(1)}$ (а), обрыва двух фаз $L^{(1,1)}$ (б), изменения сопротивления фазы $L^{(z)}$ (в)

Обрыв одной фазы. В соответствии со схемой рис. 2.32, а и табл. 2.3 запишем:

$$x_{\Delta} = \left(\frac{1}{x_{2\Sigma}} + \frac{1}{x_{0\Sigma}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{39,2} + \frac{1}{38} \right)^{-1} = 19,3 \text{ Ом};$$

$$i_{A1} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{\Delta})} = \frac{5,96}{j \cdot (39,2 + 19,3)} = -j \cdot 0,102 \text{ кА};$$

$$\Delta \dot{U}_{A1} = i_{A1} \cdot jx_{\Delta} = (-j \cdot 0,102) \cdot (j \cdot 19,3) = 1,97 \text{ кВ};$$

$$\Delta \dot{U}_{A2} = \Delta \dot{U}_{A0} = \Delta \dot{U}_{A1} = 1,97 \text{ кВ};$$

$$i_{A2} = \frac{-\Delta \dot{U}_{A2}}{j \cdot x_{2\Sigma}} = \frac{-1,97}{j \cdot 39,2} = j \cdot 0,05 \text{ кА};$$

$$i_{A0} = \frac{-\Delta \dot{U}_{A0}}{jx_{0\Sigma}} = \frac{-1,97}{j \cdot 38} = j \cdot 0,052 \text{ кА}.$$

Фазные величины:

$$i_A = j \cdot 0,052 - j \cdot 0,102 + j \cdot 0,05 = 0;$$

$$\begin{aligned} i_B &= j \cdot 0,052 + \left(-\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) (-j \cdot 0,102) + \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) j \cdot 0,05 = \\ &= -0,131 + j \cdot 0,078 = 0,153 \angle 149,3^\circ \text{ кА}; \end{aligned}$$

$$\dot{I}_C = 0,153 \angle 30,7^\circ \text{ кА};$$

$$\Delta \dot{U}_A = \Delta \dot{U}_{A0} + \Delta \dot{U}_{A1} + \Delta \dot{U}_{A2} = 3 \cdot 1,97 = 5,91 \text{ кВ};$$

$$\Delta \dot{U}_B = \Delta \dot{U}_C = 0.$$

Обрыв двух фаз. В соответствии со схемой рис. 2.32, б запишем:

$$x_\Delta = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma} = 39,2 + 38 = 77,2 \text{ Ом};$$

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_\Delta)} = \frac{5,96}{j \cdot (39,2 + 77,2)} = -j \cdot 0,051 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A0} = \dot{I}_{A2} = -j0,051 \text{ кА};$$

$$\Delta \dot{U}_{A1} = \dot{I}_{A1} \cdot jx_\Delta = (-j \cdot 0,051)(j \cdot 77,2) = 3,96 \text{ кВ};$$

$$\Delta \dot{U}_{A2} = -\dot{I}_{A2} \cdot jx_{2\Sigma} = (j \cdot 0,051)(j \cdot 39,2) = -2,02 \text{ кВ};$$

$$\Delta \dot{U}_{A0} = -\dot{I}_{A0} \cdot jx_{0\Sigma} = (j \cdot 0,051)(j \cdot 38) = -1,94 \text{ кВ}.$$

Фазные величины:

$$\dot{I}_A = 3\dot{I}_{A1} = 3(-j \cdot 0,051) = -j \cdot 0,153 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_C = 0;$$

$$\Delta \dot{U}_A = 0;$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_B &= -1,94 + \left(-\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot 3,96 + \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot (-2,02) = \\ &= -2,91 - j \cdot 5,18 = 5,94 \angle -120^\circ \text{ кВ}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_C &= -1,94 + \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot 3,96 + \left(-\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot (-2,02) = \\ &= 5,94 \angle 120^\circ \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Включение в фазу А дополнительного сопротивления
 $z = j \cdot 15 \text{ Ом}$. В соответствии с рис. 2.32, в можно записать

$$x_\Delta = \left(\frac{1}{x_{2\Sigma}} + \frac{1}{x_{0\Sigma}} + \frac{3}{z}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{39,2} + \frac{1}{38} + \frac{3}{15}\right)^{-1} = 3,97 \text{ Ом};$$

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{\Delta})} = \frac{5,96}{j \cdot (39,2 + 3,97)} = -j \cdot 0,138 \text{ кА};$$

$$\Delta \dot{U}_{A1} = \dot{I}_{A1} \cdot jx_{\Delta} = (-j \cdot 0,138)(j \cdot 3,97) = 0,548 \text{ кВ};$$

$$\Delta \dot{U}_{A1} = \Delta \dot{U}_{A2} = \Delta \dot{U}_{A0} = 0,548 \text{ кВ};$$

$$\dot{I}_{A2} = \frac{-\Delta \dot{U}_{A2}}{jx_{2\Sigma}} = \frac{-0,548}{j \cdot 39,2} = j \cdot 0,0139 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{A0} = \frac{-\Delta \dot{U}_{A0}}{j \cdot x_{0\Sigma}} = \frac{-0,548}{j \cdot 38} = j \cdot 0,0144 \text{ кА}.$$

Фазные величины:

$$\dot{I}_A = j \cdot 0,0139 - j \cdot 0,138 + j \cdot 0,0144 = -j \cdot 0,11 \text{ кА};$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= j \cdot 0,0144 + \left(-\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-j \cdot 0,138) + \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right)(j \cdot 0,0139) = \\ &= -0,131 + j \cdot 0,076 = 0,152 \angle 149,9^\circ \text{ кА}; \end{aligned}$$

$$\dot{I}_C = 0,152 \angle 30,1^\circ \text{ кА};$$

$$\Delta \dot{U}_A = \Delta \dot{U}_{A0} + \Delta \dot{U}_{A1} + \Delta \dot{U}_{A2} = 3 \cdot 0,548 = 1,644 \text{ кВ};$$

$$\Delta \dot{U}_B = \Delta \dot{U}_C = 0.$$

Результаты расчетов приведены на рис. 2.33.

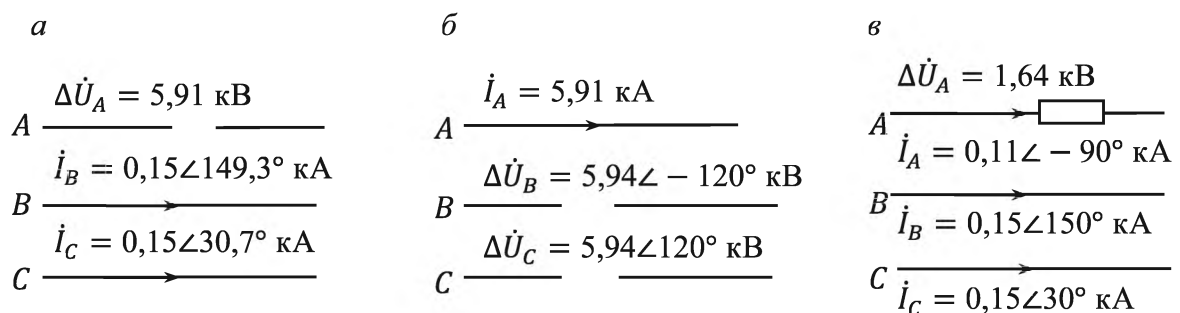


Рис. 2.33. Результаты расчетов фазных напряжений и токов для обрыва одной фазы (а), обрыва двух фаз (б), включения сопротивления в фазу А (в)

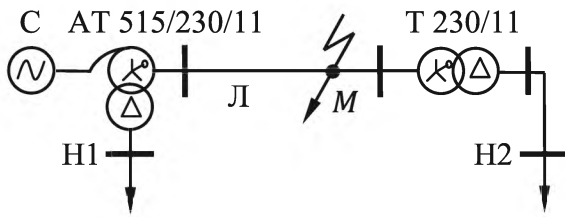


Рис. 2.34. Схема исследуемой ЭС

Пример 4

Для ЭС, схема которой изображена на рис. 2.34, определить токи, текущие в фазах нагрузки и напряжения в фазах на шинах нагрузки при $K^{(1,1)}$ в точке М.

Известны схемы замещения и их параметры для различных последовательностей (рис. 2.35), приведенные к ступени 220 кВ.

Решение. В результате предварительных расчетов для точки несимметрии были получены токи: $\dot{I}_{A1} = -j \cdot 0,84$ кА; $\dot{I}_{A2} = j \cdot 0,27$ кА; $\dot{I}_{A0} = j \cdot 0,57$ кА; $\dot{I}_{KB} = 1,29 \angle 138,4^\circ$ кА; $\dot{I}_{KC} = 1,29 \angle 41,6^\circ$ кА; и напряжения: $\dot{U}_{A1} = \dot{U}_{A2} = \dot{U}_{A0} = 23$ кВ; $\dot{U}_{KA} = 69$ кВ.

Нагрузки в основном пассивные, поэтому замещаются шунтами.

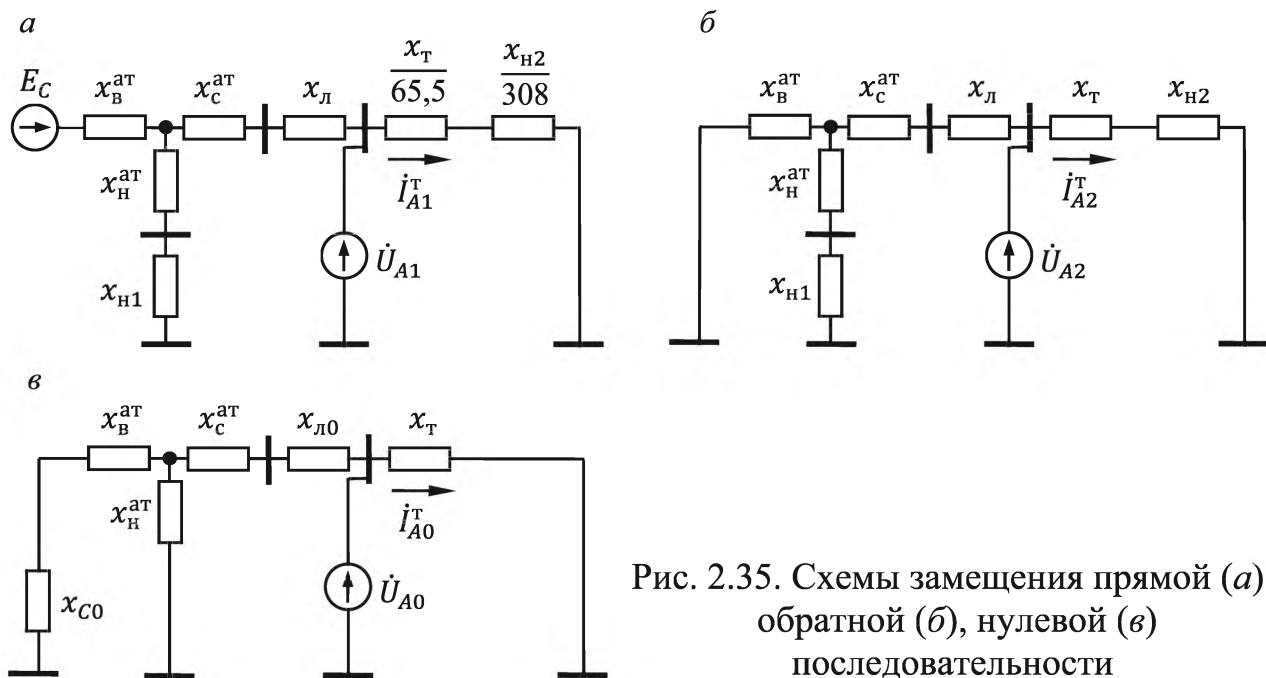


Рис. 2.35. Схемы замещения прямой (а), обратной (б), нулевой (в) последовательности

Определим токи различных последовательностей, текущих в нагрузку со стороны точки КЗ:

$$\dot{i}_{A1}^т = \frac{\dot{U}_{A1}}{j(x_T + x_{H2})} = \frac{23}{j \cdot (65,5 + 308)} = -j \cdot 0,062 \text{ кА};$$

$$\dot{i}_{A2}^т = \frac{\dot{U}_{A2}}{j(x_T + x_{H2})} = \frac{23}{j \cdot (65,5 + 308)} = -j \cdot 0,062 \text{ кА};$$

$$i_{A0}^T = \frac{\dot{U}_{A0}}{jx_T} = \frac{23}{j \cdot 65,5} = -j \cdot 0,351 \text{ кА.}$$

Определим токи в фазах со стороны высшего напряжения:

$$i_{KA}^T = -j \cdot 0,351 - j \cdot 0,062 - j \cdot 0,062 = -j \cdot 0,475 \text{ кА;}$$

$$i_{KB}^T = -j \cdot 0,351 + \left(-\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-j \cdot 0,062) + \\ + \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-j \cdot 0,062) = -j \cdot 0,289 \text{ кА;}$$

$$i_{KC}^T = -j \cdot 0,351 + \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-j \cdot 0,062) + \\ + \left(-\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-j \cdot 0,062) = -j \cdot 0,289 \text{ кА.}$$

Определим токи в нейтрали трансформатора Т:

$$i_N^T = i_{KA}^T + i_{KB}^T + i_{KC}^T = -j \cdot (0,475 + 0,289 + 0,289) = -j \cdot 1,05 = 3\dot{I}_0.$$

Определим токи в фазах нагрузки со стороны низшего напряжения. Поскольку схема соединения обмоток трансформатора λ_0/Δ , постольку трансформируются и вытекают в нагрузку только токи прямой и обратной последовательности. С учетом формулы (2.17) со с. 100 запишем

$$i_{a1}^{H2} = i_{A1}^T k_T e^{-j30^\circ N} = 0,062 \angle -90^\circ \cdot \frac{230}{11} \angle -330^\circ = \\ = 1,29 \angle -60^\circ \text{ кА;}$$

$$i_{a2}^{H2} = i_{A2}^T k_T e^{j30^\circ N} = 0,062 \angle -90^\circ \cdot \frac{230}{11} \angle 330^\circ = 1,29 \angle 240^\circ \text{ кА.}$$

Токи в фазах нагрузки с низшей стороны:

$$i_{ka}^{H2} = i_{a1}^{H2} + i_{a2}^{H2} = 1,29 \angle -60^\circ + 1,29 \angle -120^\circ = 2,24 \angle -90^\circ \text{ кА;}$$

$$i_{kb}^{H2} = a^2 i_{a1}^{H2} + a i_{a2}^{H2} = \\ = 1,29 \angle -60^\circ \cdot 1 \angle -120^\circ + 1,29 \angle -120^\circ \cdot 1 \angle 120^\circ = 0 \text{ кА;}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{KC}}^{\text{H}2} &= a\dot{I}_{a1}^{\text{H}2} + a^2\dot{I}_{a2}^{\text{H}2} = 1,29 \angle -60^\circ \cdot 1 \angle 120^\circ + \\ &+ 1,29 \angle -120^\circ \cdot 1 \angle -120^\circ = 2,24 \angle 90^\circ \text{ кА}. \end{aligned}$$

Напряжение на шинах нагрузки без учета трансформации равно

$$\dot{U}_{A1}^{\text{T}} = \dot{U}_{A1} - jx_{\text{T}}\dot{I}_{A1}^{\text{T}} = 23 - j \cdot 65,5(-j \cdot 0,062) = 18,9 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{A2}^{\text{T}} = \dot{U}_{A2} - jx_{\text{T}}\dot{I}_{A2}^{\text{T}} = 23 - j \cdot 65,5(-j \cdot 0,062) = 18,9 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{A0}^{\text{T}} = 0 \text{ кВ}.$$

Напряжения на шинах нагрузки с учетом коэффициента трансформации:

$$\dot{U}_{a1}^{\text{H}2} = \dot{U}_{A1}^{\text{T}} \frac{1}{k_{\text{T}}} e^{-j \cdot 30^\circ N} = 18,9 \frac{11}{230} \angle -330^\circ = 0,9 \angle 30^\circ \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{a2}^{\text{H}2} = \dot{U}_{A2}^{\text{T}} \frac{1}{k_{\text{T}}} e^{j \cdot 30^\circ N} = 18,9 \frac{11}{230} \angle 330^\circ = 0,9 \angle -30^\circ \text{ кВ};$$

фазные напряжения

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{Ka}}^{\text{H}2} &= \dot{U}_{a1}^{\text{H}2} + \dot{U}_{a2}^{\text{H}2} = 0,9 \angle 30^\circ + 0,9 \angle -30^\circ = \\ &= 0,78 + j \cdot 0,45 + 0,78 - j \cdot 0,45 = 1,56 \text{ кВ}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{Kb}}^{\text{H}2} &= a^2 \dot{U}_{a1}^{\text{H}2} + a \dot{U}_{a2}^{\text{H}2} = \\ &= 0,9 \angle 30^\circ \cdot 1 \angle -120^\circ + 0,9 \angle -30^\circ \cdot 1 \angle 120^\circ = 0 \text{ кВ}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{Kc}}^{\text{H}2} &= a \dot{U}_{a1}^{\text{H}2} + a^2 \dot{U}_{a2}^{\text{H}2} = 0,9 \angle 30^\circ \cdot 1 \angle 120^\circ + \\ &+ 0,9 \angle -30^\circ \cdot 1 \angle -120^\circ = 1,56 \angle 180^\circ \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Результаты расчетов приведены на рис. 2.36.

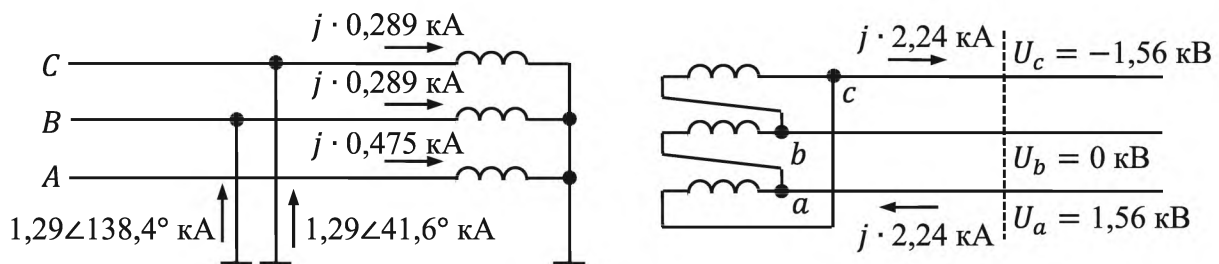


Рис. 2.36. Распределение токов и напряжений по фазам

Пример 5

Рассчитать сопротивление воздушной линии ($\ell = 1$ км, провод марки АС-300) токам нулевой последовательности для следующих вариантов исполнения: вариант 1 — одноцепная линия без грозозащитного троса, расположение фаз горизонтальное, без расщепления; вариант 2 — двучепная без грозозащитного троса и без расщепления; вариант 3 — одноцепная с грозозащитным тросом.

Решение.

Вариант 1. При $f = 50$ Гц, среднем значении $\lambda = 10^{-6} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ глубина возврата тока через землю D_3 по формуле (2.10 со с. 91) приблизительно равна 935 м. По формуле (2.11) со с. 92 удельное активное сопротивление земли $r_3^{\text{уд}}$ составляет 0,05 Ом/км, т. к. в нашем случае $\ell = 1$ км, то $r_3 = 0,05 \cdot 1 = 0,05$ Ом. Активное сопротивление отдельного провода

$$r_{\text{пр}} = \frac{\rho \ell}{S} = \frac{31,5 (\text{Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}) \cdot 1 \text{ км}}{300 \text{ мм}^2} = 0,105 \text{ Ом}.$$

Сечение АС-300 применяется начиная со ступени напряжения 220 кВ. Минимальное расстояние d_{AB} между фазными проводами при горизонтальном расположении фаз на данном классе напряжения равно 7 м. Среднегеометрическое расстояние между фазными проводами $D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{d_{AB} d_{AC} d_{BC}} = \sqrt[3]{7 \cdot 14 \cdot 7} = 8,82$ м. Эквивалентный радиус фазы при отсутствии расщепления и с учетом коэффициентов (см. табл. 2.3) на с. 106 равен

$$R_3 = 0,95 R = 0,95 \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 0,95 \cdot \sqrt{\frac{300}{3,14}} = 9,29 \text{ мм}.$$

В таком случае сопротивление линии токам нулевой последовательности по формуле (2.12) со с. 93 будет составлять

$$\begin{aligned} z_0 &= r_{\text{пр}} + 3r_3 + j \cdot 0,435 \ell \lg \left(\frac{D_3}{\sqrt[3]{D_{\text{ср}}^2 R_3}} \right) = \\ &= 0,105 + 3 \cdot 0,05 + j \cdot 0,435 \lg \left(\frac{935}{\sqrt[3]{8,82^2 \cdot 9,29 \cdot 10^{-3}}} \right) = \\ &= 0,255 + j \cdot 1,31 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Сопротивление линии токам прямой последовательности находится по формуле (2.13) и в рассматриваемом случае с учетом длины линии равно

$$z_1 = r_{\text{пр}} + j \cdot 0,1445 \ell \lg \left(\frac{D_{\text{ср}}}{R_3} \right) =$$

$$= 0,105 + j \cdot 0,1445 \lg \left(\frac{8,82}{9,29 \cdot 10^{-3}} \right) = 0,105 + j \cdot 0,43 \text{ Ом.}$$

Соотношение сопротивлений $x_0/x_1 = 1,31/0,43 = 3,1$ (приближенное значение равно 3,5).

Вариант 2. Для двухцепной ЛЭП сопротивление каждой цепи дополнительно увеличивается благодаря взаимоиндукции между каждым проводом одной цепи и тремя проводами другой. Средние значения расстояний между соседними ЛЭП разных классов напряжений приведены ниже:

Класс напряжения, кВ	Расстояние между осями соседних ЛЭП, м
35.....	4
110.....	9
220.....	18
330.....	25
500.....	37,5

Если обе ВЛ подключены с обоих концов к одним шинам, схема замещения имеет вид, представленный на рис. 2.13 (см. с. 93). Подобную схему можно использовать при подключении ВЛ к общим шинам с одного конца (рис. 2.37).

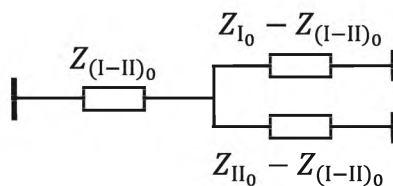


Рис. 2.37. Схема замещения двухцепной ВЛ нулевой последовательности

Сопротивление нулевой последовательности каждой цепи дополнительно изменяется благодаря сопротивлению взаимоиндукции с проводами соседней цепи, которое по формуле (2.14) со с. 93 составляет

$$z_{(I-II)_0} = 3 \left(r_3 + j \cdot 0,145 \lg \frac{D_3}{D_{I-II_0}} \right) =$$

$$= 3 \left(0,05 + j \cdot 0,145 \lg \frac{935}{27,78} \right) = 0,15 + j \cdot 0,664 \text{ Ом.}$$

Расстояние между двумя параллельными цепями d принимается равным 15 м, тогда расстояния между фазными проводами соседних цепей (abc и ABC) равны, м, $d_{aA} = 29$, $d_{bA} = 22$, $d_{cA} = 15$, $d_{aB} = 36$, $d_{bB} = 29$, $d_{cB} = 22$, $d_{aC} = 43$, $d_{bC} = 36$, $d_{cC} = 29$, а среднегеометрическое расстояние, м, определяется по формуле (2.30)

$$D_{I-II_0} = \sqrt[9]{d_{aA}d_{bA}d_{cA}d_{aB}d_{bB}d_{cB}d_{aC}d_{bC}d_{cC}} =$$

$$= \sqrt[9]{29 \cdot 22 \cdot 15 \cdot 36 \cdot 29 \cdot 22 \cdot 43 \cdot 36 \cdot 29} = 27,78.$$

При идентичности параллельных цепей

$$z_{I_0} = z_{II_0} = z_0 = 0,255 + j \cdot 1,31 \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности (при упрощении схемы рис. 2.37)

$$z_{I,II_0} = z_{(I-II)_0} + \frac{z_0 - z_{(I-II)_0}}{2} = \frac{z_0 + z_{(I-II)_0}}{2} = 0,2025 + j \cdot 0,987 \text{ Ом.}$$

Соотношение сопротивлений $x_0/x_1 = 0,987/0,43 = 2,3$.

Вариант 3. Тросы используют в качестве средства грозозащиты линии, располагая их в верхней точке опоры. Если тросы заземлять на каждой опоре, то в образующихся контурах могут протекать наведенные токи. Поскольку большинство существующих ЛЭП имеет именно такую систему заземления тросов, то при нахождении сопротивления нулевой последовательности надо учитывать наведенные токи (рис. 2.38).

Если рассматривать трос как независимую однопроводную линию «провод–земля», можно в формуле (2.13) со с. 93 определить сопротивление нулевой последовательности троса относительно земли:

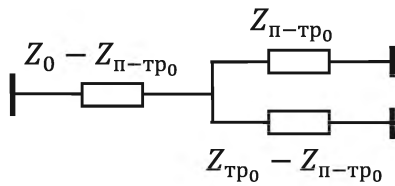


Рис. 2.38. Схема замещения нулевой последовательности с учетом грозозащитного троса

$$z_{T_0} = 3 \left(r_{тр} + r_3 + j \cdot 0,145 \lg \frac{D_3}{R_{тр.э}} \right),$$

где $r_{тр}$ — активное сопротивление троса; $R_{тр.э}$ — эквивалентный радиус.

Следовательно, сопротивление линии относительно земли необходимо уменьшить на значение z_{T_0}

$$z_{п-тр0} = 3 \left(r_3 + j \cdot 0,145 \lg \frac{D_3}{D_{п-тр}} \right).$$

Высота подвеса троса зависит от типа и материала применяемых опор. Для опор с горизонтальным расположением фаз (220 кВ) примем высоту подвеса троса 4 м, тогда расстояния «трос–фаза», м, составляет: $D_{АТ} = 8,1$, $D_{ВТ} = 4$, $D_{СТ} = 8,1$. Среднегеометрическое расстояние между проводом и тросом $D_{п-тр} = \sqrt[3]{D_{АТ} D_{ВТ} D_{СТ}} = \sqrt[3]{8,1 \cdot 4 \cdot 8,1} = 6,4$ м. Трос стальной марки С70, истинный радиус $R_{тр} = \sqrt{70/\pi} = 4,72$ мм, тогда эквивалентный радиус

$$R_{тр.э} = \sqrt[3]{R_{тр} D_{п-тр}^2} = \sqrt[3]{4,72 \cdot 10^{-3} \cdot 6,4^2} = 0,58 \text{ м},$$

активное сопротивление $r_{тр}$ учитывать не будем. Сопротивления

$$z_{T_0} = 3r_{тр} + 0,15 + j \cdot 0,435 \lg(935/0,58) = 0,15 + j \cdot 1,4 \text{ Ом},$$

$$z_{п-тр0} = 3(0,05 + j \cdot 0,145 \lg(935/6,4)) = 0,15 + j \cdot 0,94 \text{ Ом},$$

эквивалентное сопротивление нулевой последовательности

$$\begin{aligned} z_{0_3} &= z_0 - \frac{z_{п-тр0}^2}{z_{T_0}} = 0,255 + j \cdot 1,31 - \frac{(0,15 + j \cdot 0,94)^2}{0,15 + j \cdot 1,4} = \\ &= 0,12 + j \cdot 0,685 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

$$\text{Отношение } x_0/x_1 = 0,685/0,43 = 1,6.$$

Таким образом, наличие грозозащитного троса уменьшает сопротивление ЛЭП токам нулевой последовательности по сравнению с сопротивлением ЛЭП без троса.

Пример 6

На одной из цепей двухцепной линии передачи происходит КЗ. Требуется построить кривые изменения сверхпереходного тока в ме-

сте КЗ и токов в выключателях В-1 и В-2 при перемещении точки КЗ K по данной цепи линии. Построение произвести для двух видов КЗ: трехфазного и однофазного. Схему сети см. на рис. 2.39. Характеристики оборудования: генератор $S_{\text{ном}} = 117,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{\text{ном}} = 13,8 \text{ кВ}$; $x''_{d(*)} \approx x_2 = 0,138 \text{ о. е.}$, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$. Трансформатор Т-1: $S_{\text{ном}} = 125 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{\text{Вном1}}/U_{\text{Нном1}} = 121/13,8$, $u_{k\%} = 10,5 \%$, соединение обмоток — λ_o/Δ . Трансформатор Т-2: $S_{\text{ном}} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{\text{Вном2}}/U_{\text{Нном2}} = 121/10,5$, $u_{k\%} = 9,7 \%$, соединение обмоток — λ_o/Δ . Линия $\ell = 80 \text{ км}$, $x_{\text{уд}} = 0,4 \text{ Ом/км}$ одной цепи, $x_0 = 3,5 x_1$ без учета влияния соседней цепи, реактивность взаимной индукции между цепями в нулевой последовательности $x_{(\text{I-II})_0} = 2 x_1$. До КЗ генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

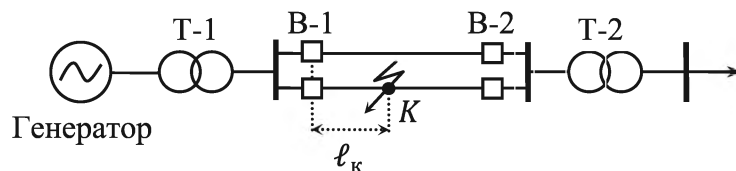


Рис. 2.39. Исходная схема к примеру 6

Решение. Решение проводим в именованных единицах, приводя параметры схемы замещения к ступени напряжения линии электропередачи:

$$x_{\Gamma} = x''_{d(*)} \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} \left(\frac{U_{\text{Вном1}}}{U_{\text{Нном1}}} \right)^2 = 0,138 \cdot \frac{13,8^2}{117,5} \cdot \left(\frac{121}{13,8} \right)^2 =$$

$$= 0,224 \cdot 76,88 = 17,22 \text{ Ом.}$$

$$E_{\Gamma} \approx \left(\frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} + I_{\text{ном}} x''_d \sin \varphi_{\text{ном}} \right) \frac{U_{\text{Вном1}}}{U_{\text{Нном1}}} =$$

$$= \left(\frac{13,8}{\sqrt{3}} + \frac{117,5}{13,8 \cdot \sqrt{3}} \cdot 0,224 \cdot 0,6 \right) \cdot \frac{121}{13,8} = 75,73 \text{ кВ.}$$

Определим сопротивление трансформаторов

$$x_{\text{Т1}} = \frac{u_{k\%}}{100} \frac{U_{\text{Вном1}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{121^2}{125} = 12,3 \text{ Ом,}$$

$$x_{T2} = \frac{u_{k\%}}{100} \frac{U_{ВНОМ2}^2}{S_{НОМ}} = \frac{9,7}{100} \cdot \frac{121^2}{100} = 14,2 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление неповрежденной цепи $x_1 = x_{уд}\ell = 0,4 \cdot 80 = 32 \text{ Ом}$. Сопротивление нулевой последовательности одной цепи $x_0 = 3,5 \cdot 32 = 112 \text{ Ом}$, сопротивление взаимоиндукции токам нулевой последовательности $x_{I-II_0} = 2 \cdot 32 = 64 \text{ Ом}$.

Трехфазное КЗ. Обозначим относительную длину участка поврежденной цепи, отсчитываемую от выключателей В-1, как $n = \ell_k / \ell$, тогда сопротивления участков поврежденной линии будут соответственно составлять, Ом, $x_{1n} = x_{уд}\ell_k = x_1 n = 32n$ и $x_{2n} = 32(1 - n)$.

На схеме замещения (рис. 2.40) $x_{ГТ1} = x_{Г} + x_{Т1} = 7,22 + 12,3 = 19,52 \text{ Ом}$. Эквивалентное сопротивление, Ом,

$$x_3 = x_{ГТ1} + \frac{x_{1n}(x_{2n} + x_1)}{x_{1n} + x_{2n} + x_1} = 19,52 + 16 n(2 - n).$$

Ток в месте КЗ, кА,

$$I_{п0} = \frac{E_{Г}}{x_3} = \frac{76,65}{19,52 + 16 n(2 - n)},$$

а токи в выключателях, кА,

$$I_{В1} = I_{п0} \frac{x_1 + x_{2n}}{x_{1n} + x_{2n} + x_1} = I_{п0} \left(1 - \frac{n}{2}\right),$$

$$I_{В2} = I_{п0} \frac{x_{1n}}{x_{1n} + x_{2n} + x_1} = I_{п0} \frac{n}{2}.$$

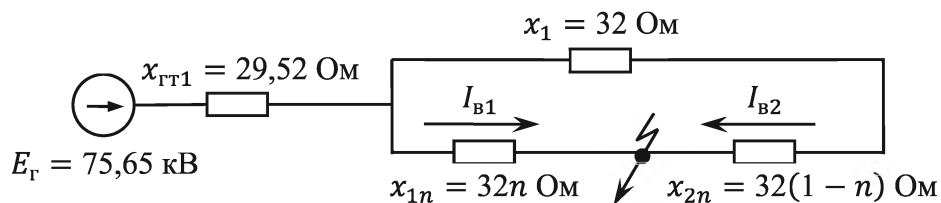


Рис. 2.40. Схема замещения при трехфазном КЗ

Для нескольких значений n по указанным выражениям легко подсчитать значения искомых токов. По результатам таких подсчетов построены кривые, которые приведены на графике рис. 2.41.

Наименьшее значение тока в месте КЗ и в выключателе В-1 и соответственно наибольшее значение тока в выключателе В-2, как следовало ожидать, получаются при КЗ в конце линии.

Однофазное КЗ. При расчете несимметричных режимов воспользуемся методом симметричных составляющих. Составим схемы замещения токов прямой, обратной и нулевой последовательности. Схема замещения прямой последовательности совпадает со схемой на рис. 2.40 для расчета токов трехфазного замыкания, $E_{1\Sigma} = 75,65$ кВ, $x_{1\Sigma} = 29,52 + 16n(2 - n)$ Ом. Схема замещения обратной последовательности не содержит ЭДС, и поскольку для генератора принято $x_2 \approx x_d''$, постольку результирующие сопротивления прямой и обратной последовательностей будут одинаковы $x_{2\Sigma} = x_{1\Sigma}$.

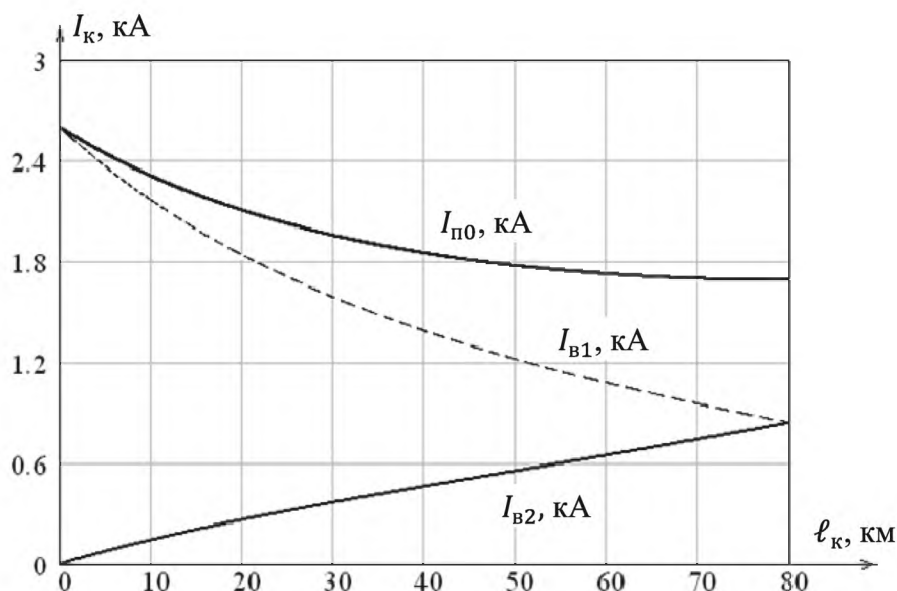


Рис. 2.41. Графики токов трехфазного КЗ в точке КЗ и в выключателях В-1 и В-2

Схема замещения нулевой последовательности приведена на рис. 2.42, а, где у фигурных скобок указаны значения реактивностей взаимной индукции между цепями линии на отдельных участках. После первого шага преобразования и освобождения от магнитной связи между цепями эта схема приобретает вид, показанный на рис. 2.42, б. Заменив получившееся соединение в треугольник эквивалентным в звезду и произведя последовательное сложение сопротивлений элементов, получим упрощенную схему (рис. 2.43), результирующее сопротивление которой составляет

$$x_{0\Sigma} = 24n(1-n) + \frac{(88n + 12,3) \cdot (24(1-n) + 78,2 - 64n)}{88n + 12,3 + 24(1-n) + 78,2 - 64n}.$$

Суммарное сопротивление при однофазном КЗ

$$x_{\Sigma KB}^{(1)} = x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma} \approx 70 + 157n - 124n^2.$$

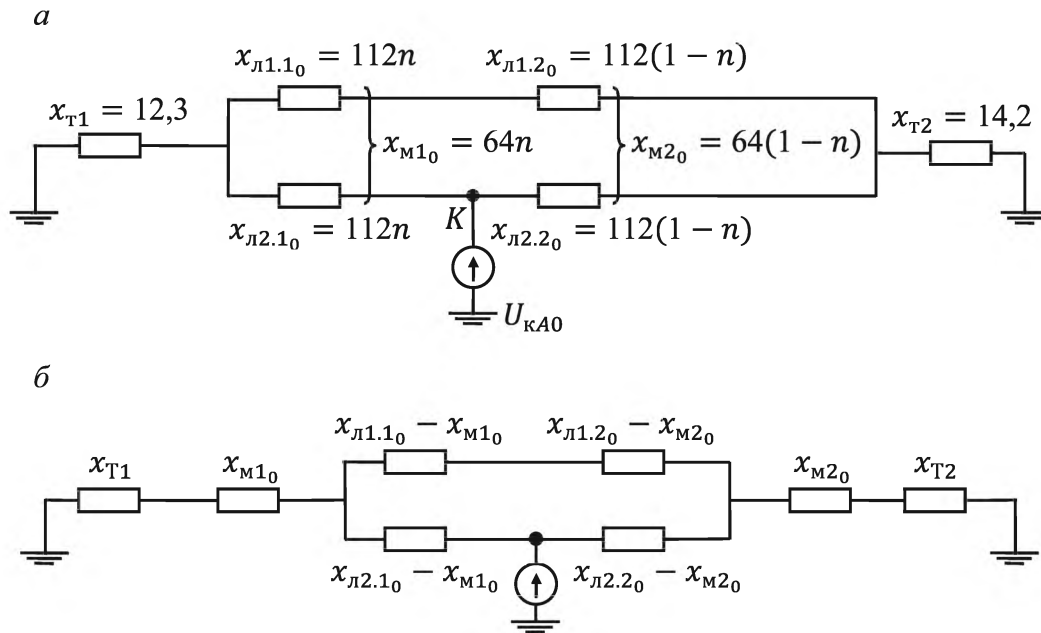


Рис. 2.42. Схемы нулевой последовательности:
а – исходная; б – после первого шага преобразования

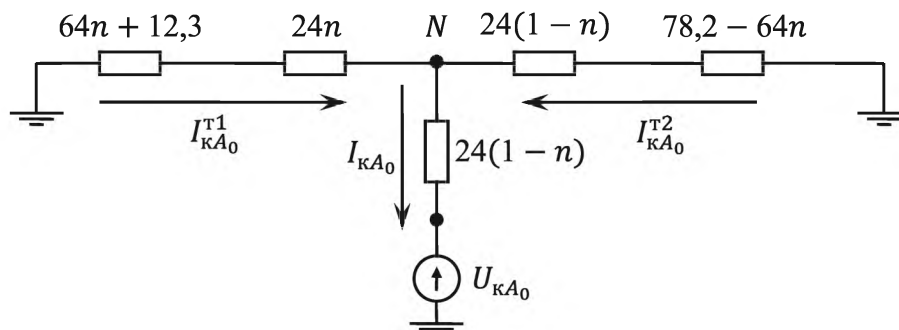


Рис. 2.43. Преобразованная схема замещения
нулевой последовательности

Следовательно, ток прямой последовательности будет

$$I_{KA_1} = \frac{E_{1\Sigma}}{x_{\text{ЭКВ}}^{(1)}} = \frac{75,65}{70 + 157n - 124n^2},$$

а ток в поврежденной фазе

$$I_{KA}^{(1)} = 3I_{KA_1} = \frac{226,95}{70 + 157n - 124n^2}.$$

Графики изменения токов, протекающих через поврежденную фазу в точке КЗ и через выключатели В-1 и В-2, приведены на рис. 2.44.

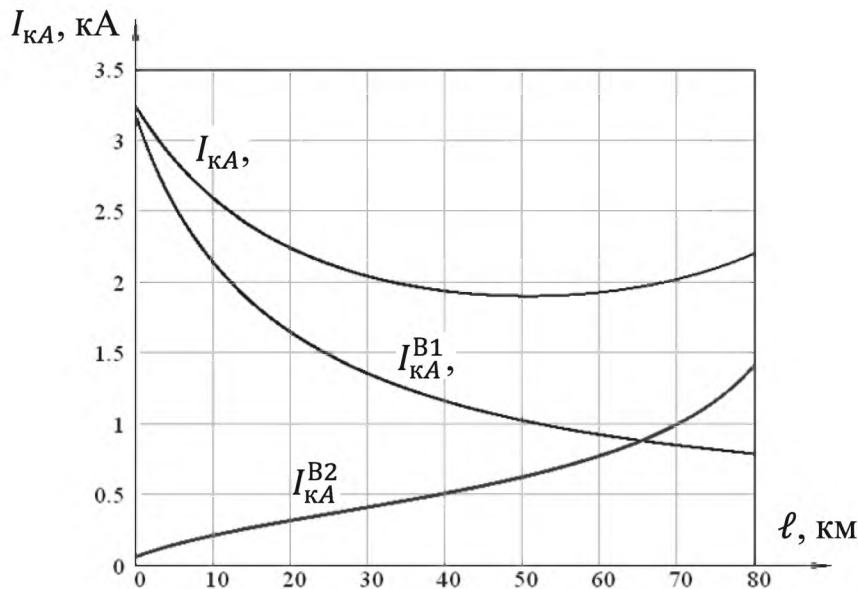


Рис. 2.44. Токи при однофазном КЗ

Для нахождения токов через выключатели необходимо предварительно найти распределение токов для схем прямой, обратной и нулевой последовательности. Для схемы замещения прямой последовательности $I_{KA_1}^{B1} = I_{KA_1} (2 - n)/2$, $I_{KA_1}^{B2} = I_{KA_1} n/2$. Аналогично находим распределение токов для схемы замещения обратной последовательности, т. к. при однофазном замыкании $I_{KA_2} = I_{KA_1}$ и сопротивления одинаковы. Для нахождения токов нулевой последовательности, протекающих через выключатели, необходимо определить $U_{KA_0} = -x_{0\Sigma} I_{KA_1}$,

$$U_{KA_0}^N = U_{KA_0} + 24n(1-n)I_{KA_1} = \\ = -I_{KA_1} (88n + 12,3)(102,2 - 88n)/114,5,$$

тогда

$$I_{KA_0}^{T1} = \frac{-U_{KA_0}^N}{88n + 12,3} = I_{KA_1} \frac{102,2 - 88n}{114,5}; \\ I_{KA_0}^{T2} = \frac{-U_{KA_0}^N}{102,2 - 88n} = I_{KA_1} \frac{88n + 12,3}{114,5}.$$

Пользуясь методом наложения, получим

$$I_{KA_0}^{B1} = \frac{(2-n)}{2} I_{KA_0}^{T1} + \frac{(1-n)}{2} I_{KA_0}^{T2} \text{ и } I_{KA_0}^{B2} = \frac{n}{2} I_{KA_0}^{T1} + \frac{(1+n)}{2} I_{KA_0}^{T2}.$$

В таком случае фазные токи в выключателях будут равны. Для выключателя В-1

$$I_{KA}^{B1} = I_{KA_1}^{B1} + I_{KA_2}^{B1} + I_{KA_0}^{B1} = I_{KA_1} \left(\frac{2-n}{2} \right) + I_{KA_1} \left(\frac{2-n}{2} \right) + \\ + I_{KA_1} \frac{(2-n)(102,2 - 88n)}{229} + I_{KA_1} \frac{(1-n)(88n + 12,3)}{229}$$

и для В-2

$$I_{KA}^{B2} = I_{KA_1}^{B2} + I_{KA_2}^{B2} + I_{KA_0}^{B2} = \frac{n}{2} I_{KA_1} + \frac{n}{2} I_{KA_1} + \\ + I_{KA_1} \frac{n(102,2 - 88n)}{229} + I_{KA_1} \frac{(1+n)(88n + 12,3)}{229}.$$

Интересно отметить, что кривые токов I_{KA} и I_{KA}^{B2} при однофазном КЗ расположены выше, чем при трехфазном ($I_{п0}$ и I_{B2}), а кривые тока I_{KA}^{B1} (I_{B1}) при этих видах КЗ пересекаются, т. е. при однофазном КЗ в начале линии этот ток больше, чем при трехфазном, и с увеличением удаленности точки замыкания наблюдается обратная картина.

3. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 3–35 кВ И В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ

3.1. Особенности расчета токов КЗ в распределительных сетях напряжением 3–35 кВ

Распределительные сети напряжением 3–35 кВ и системы электроснабжения напряжением 1 кВ и ниже характеризуются относительно большой электрической удаленностью от источников питания. Обычно сети данных классов напряжения отделены от основных сетей двумя и более ступенями трансформации, поэтому электрические режим работы практически не влияют на режим основной ЭС. В расчетах КЗ, как правило, напряжение в точках замыкания таких сетей может считаться постоянным.

В распределительных сетях и системах электроснабжения широко используются кабельные линии, воздушные линии малых сечений, воздушные линии со стальными проводами, что приводит к необходимости учета активных сопротивлений таких линий. Уже упоминалось, что при достаточной продолжительности КЗ увеличение активного сопротивления проводника может вызвать заметное снижение тока КЗ (тепловой спад тока). Особенно сильно данный эффект проявляется на участках воздушной линии со стальными проводами, параметры которых в большой степени зависят от величины тока, протекающего по ним.

Распределительные сети напряжений 3–35 кВ, как правило, работают с изолированной нейтралью или с нейтралью, заземленной через сопротивление. Поэтому значение тока, возникающего при замыкании на землю одной фазы, значительно меньше тока однофазного замыкания в сетях с глухо заземленной нейтралью и обусловлено емкостной проводимостью сети. Сети с изолированной или компенсированной нейтралью принято называть сетями с *малыми токами замыкания на землю*, а однофазное замыкание — *простым замыканием на землю*.

3.2. Простое замыкание на землю

Простым замыканием на землю называется замыкание на землю одной фазы в сетях с изолированной нейтралью. В этом случае путь для тока, замыкающегося через землю, осуществляется через емкостную проводимость элементов каждой фазы относительно земли.

Рассмотрим этот режим (рис. 3.1). Поскольку нейтраль изолирована, ток поврежденной фазы будет возвращаться через паразитную распределенную емкость C_0 проводов неповрежденных фаз. Очевидно, наибольший ток будет в точке повреждения. Токи в неповрежденных фазах будут постепенно возрастать по мере приближения к источнику.

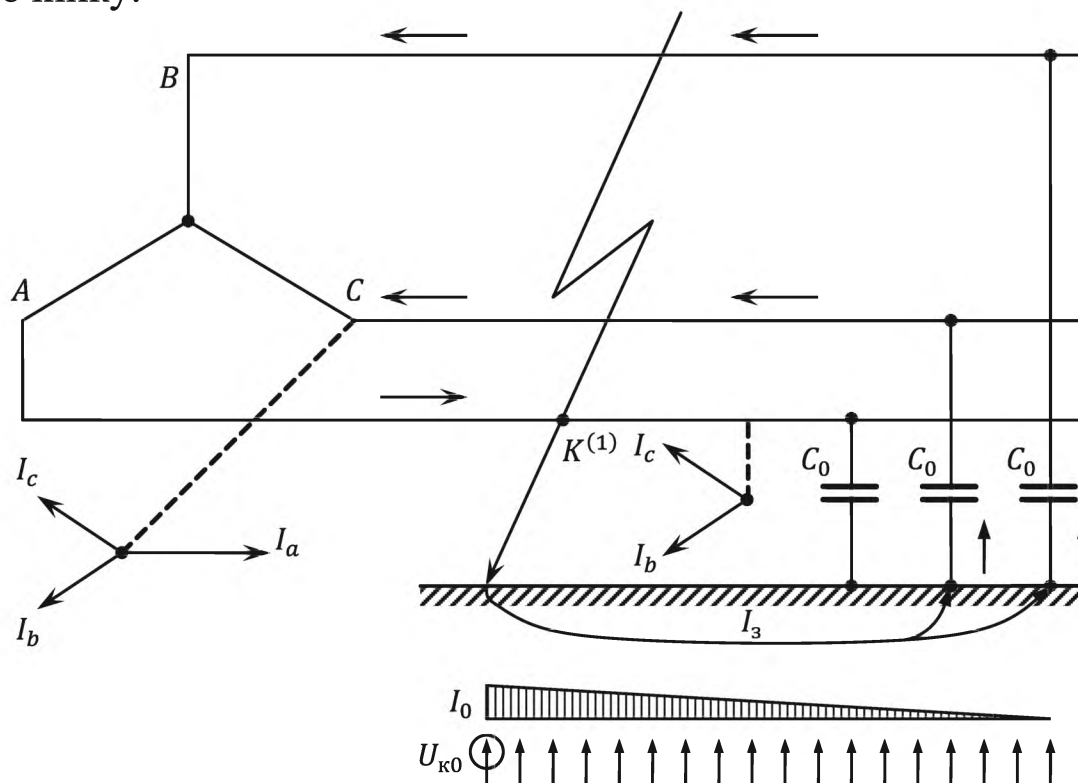


Рис. 3.1. Принципиальная схема и эпюра пространственного распределения тока нулевой последовательности

Распределение емкости каждой фазы относительно земли вдоль линии условно представлено сосредоточенными емкостями в конце линии. Ток однофазного замыкания протекает в землю в точке повреждения фазы (фаза A на рис. 3.1) и возвращается по неповрежденным фазам (B и C) через емкостные проводимости относительно земли.

Емкостная проводимость поврежденной фазы оказывается зашунтированной, поэтому ток в ней справа от замыкания отсутствует (если пренебрегать весьма малым током, который наводится токами двух других фаз на данном участке линии). Векторные диаграммы токов слева и справа от места замыкания показаны на рис. 3.1.

В действительности емкостная проводимость линии распределяется равномерно по всей ее длине, поэтому эпюра пространственного распределения тока нулевой последовательности I_0 , который состав-

ляет $1/3$ от полного тока замыкания на землю I_3 , вдоль линии выражается наклонной прямой.

Граничные условия для простого замыкания могут быть записаны так же, как и для однофазного КЗ:

$$I_{KB}^{(1)} = 0, I_{KC}^{(1)} = 0; U_{KA}^{(1)} = 0, x_C \gg x_L, r,$$

следовательно, при определении величины тока простого замыкания на землю можно пренебречь активным и продольным реактивным сопротивлением и считать, что значение тока практически не зависит от места замыкания в рассматриваемой электрически связанной сети. Из-за малости тока замыкания на землю можно считать напряжение источника неизменным.

Расчет тока простого замыкания производится аналогично расчету однофазного КЗ $K^{(1)}$ для сетей с глухозаземленной нейтралью, поэтому

$$i_{A1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}, \quad (3.1)$$

где $i_{A1}^{(1)}$ — значение тока прямой последовательности; $\dot{E}_{1\Sigma}$ — результирующее фазное значение ЭДС; $Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$, $Z_{0\Sigma}$ — результирующие значения сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательности соответственно.

Сопротивление нулевой последовательности $Z_{0\Sigma}$ состоит из трех составляющих $Z_{0\Sigma} = r_{0\Sigma} + j(x_{0L} - x_{0C})$, причем сопротивление x_{0C} по модулю превосходит все остальные сопротивления $Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$, x_{0L} , $r_{0\Sigma}$ настолько, что ими можно пренебречь. Сети с изолированной нейтралью обычно не имеют собственных источников, питание осуществляется от понижающего трансформатора. В этом случае шины высшего напряжения трансформатора можно считать источником бесконечной мощности, тогда

$$i_{A1}^{(1)} = U_{\text{ф.ср}} / (-jx_{0C}),$$

а ток в поврежденной фазе составляет

$$i_3^{(1)} = j \cdot 3 \frac{U_{\text{ф.ср}}}{x_{0C}}.$$

Значение тока простого замыкания на землю существенно ниже, чем при КЗ. Это значит, что термическое и динамическое воздействие этого тока на элементы электрической системы можно не учитывать. Однако довольно часто в точке простого замыкания возникает перемежающаяся дуга, последствием которой являются всплески перенапряжений и затем переход простого замыкания в междуфазное. При дуговом замыкании на землю ток поврежденной фазы будет равен

$$i_3^{(1д)} = 3 \frac{U_{\text{ф.ср}}}{3r_d - jx_{0C}},$$

где r_d — активное сопротивление дуги.

Ограничение тока достигается путем включения в нейтраль дугогасительного реактора с индуктивностью x_L (см. рис. 3.2). Поскольку x_L оказывается включенным параллельно с емкостным сопротивлением x_{0C} , постольку

$$x_{0\Sigma} = - \frac{3x_L x_{0C}}{3x_L - x_{0C}}.$$

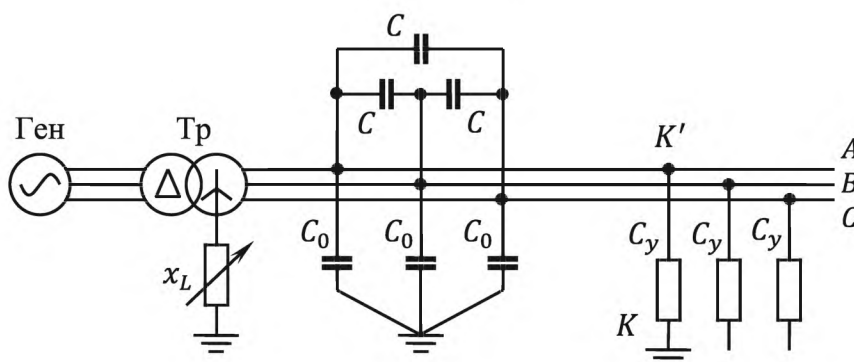


Рис. 3.2. Участок сети с трансформатором, имеющим заземленную нейтраль

В таком случае, если пренебречь реактивностью трансформатора, при $x_L = x_{0C}/3$ получается условие резонанса тока, т. е. условие полной компенсации тока простого замыкания. Такие реакторы называются дугогасящими. Они, как правило, имеют возможность регулировать индуктивность для выполнения настройки при изменениях параметров защищаемой сети. Максимально допустимое значение емкостного тока простого замыкания определяется конкретными условиями и указано в Правилах технической эксплуатации (ПТЭ).

В соответствии с ПТЭ ток простого замыкания на землю следует ограничивать до значения, при котором дуга гаснет без повторных зажигания. Из опыта эксплуатации электрических сетей можно определить следующие значения: 6 кВ — 30 А; 10 кВ — 20 А; 15–20 кВ — 15 А; 35 кВ — 10 А.

Векторная диаграмма напряжений и токов в месте замыкания на землю приведена на рис. 3.3. С изменением сопротивления дуги r_d концы векторов токов и напряжений скользят по дугам соответствующих окружностей. Треугольник, соответствующий линейным напряжениям, остается без изменений, но перемещается параллельно самому себе в соответствии с перемещением центра, положение которого определяется напряжением нулевой последовательности.

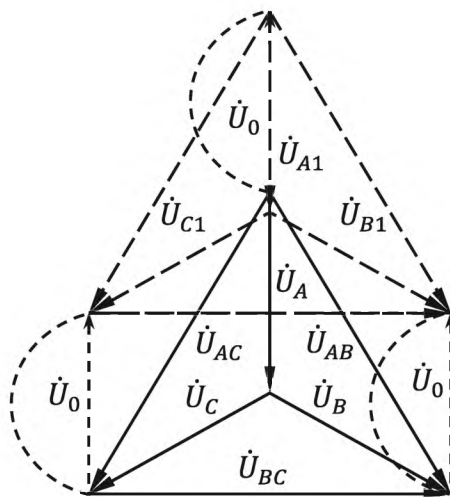


Рис. 3.3. Векторная диаграмма напряжений

Неизменность линейных напряжений обуславливает практически постоянное значение тока в емкостной проводимости между фазами как при нормальных условиях, так и при простом замыкании на землю. С изменением сопротивления дуги напряжение поврежденной фазы стремится к нулю, а напряжения неповрежденных фаз — к соответствующим линейным напряжениям.

Приближенно оценить величину x_{0C} можно по известным формулам. Для грубой оценки величины тока емкостное сопротивление можно оценить по длине линий ℓ . Для воздушных ЛЭП $x_{0C} \approx \ell/350$, для кабельных $x_{0C} \approx \ell/10$.

3.3. Особенности расчета токов КЗ в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ

При расчетах токов КЗ в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ разрешается:

- 1) использовать упрощенные методы расчетов, если их погрешность не превышает 10 %;
- 2) максимально упрощать и эквивалентировать всю внешнюю сеть по отношению к месту КЗ и индивидуально учитывать только автономные источники электроэнергии и электродвигатели, непосредственно примыкающие к месту КЗ;
- 3) не учитывать ток намагничивания трансформаторов;
- 4) не учитывать насыщение магнитных систем электрических машин;
- 5) принимать коэффициенты трансформации трансформаторов равными отношению средних номинальных напряжений тех ступеней напряжения сетей, которые связывают трансформаторы. При этом следует использовать следующую шкалу средних номинальных напряжений, кВ: 37; 24; 20; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,525; 0,4; 0,23;
- 6) не учитывать влияние синхронных и асинхронных электродвигателей или комплексной нагрузки, если их суммарный номинальный ток не превышает 1 % от начального значения периодической составляющей тока в месте КЗ, рассчитанного без учета электродвигателей или комплексной нагрузки.

Токи КЗ могут достигать огромных значений из-за малых сопротивлений сетей, поэтому при расчетах требуется учитывать ряд дополнительных факторов:

- активные сопротивления шин, контактов, трансформаторов тока, первичные обмотки которых включены в силовые цепи и т. п.;
- явление теплового спада тока КЗ;
- увеличение времени отключения тока КЗ из-за многоступенчатости защиты, установленной в разветвленных цепях.

Следует отметить, что в соответствии с ГОСТ 28249–93 сопротивление всех элементов короткозамкнутой цепи можно определять в миллиомах (мОм). Методика расчета начального действующего значения периодической составляющей тока трехфазного замыкания

зависит от способа электроснабжения электроустановки (от энергосистемы или автономного источника).

В первом случае допускается считать, что понижающие (до 0,4 кВ) трансформаторы, осуществляющие связь с энергосистемой, подключены к источнику бесконечной мощности с $U_{\text{сист}} = U_{\text{ср.номН}}$ и эквивалентным сопротивлением X_c , мОм, которое можно определить по одному из выражений (с учетом приведения к ступени низшего напряжения сети):

$$X_c = \frac{U_{\text{ср.номН}}^2}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{п,0В}} U_{\text{ср.номВ}}} = \frac{U_{\text{ср.номН}}^2}{S_k} \cdot 10^{-3}, \quad (3.2)$$

$$X_c = \frac{U_{\text{ср.номН}}^2}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{отк.ном}} U_{\text{ср.номВ}}}, \quad (3.3)$$

где $U_{\text{ср.номН}}$ ($U_{\text{ср.номВ}}$) — среднее номинальное (эксплуатационное) напряжение сети, подключенной к обмотке низшего (высшего) напряжения трансформатора, В; $I_{\text{п,0В}}$ — действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ на выводах обмотки ВН трансформатора, кА; S_k — условная мощность КЗ у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, МВ·А; $I_{\text{отк.ном}}$ — номинальный ток отключения выключателя, установленного на стороне высшего напряжения трансформатора, кА.

При подключении понижающего трансформатора к сети через реактор, воздушную или кабельную линию (длиной более 1 км) помимо индуктивных сопротивлений учитываются и активные сопротивления этих элементов.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ при отсутствии подпитки со стороны электродвигателей и подключении понижающего трансформатора к энергосистеме рассчитывается по выражению, кА,

$$I_{\text{п0}} = \frac{U_{\text{ср.номН}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{\text{к}\Sigma}^2 + X_{\text{к}\Sigma}^2}}, \quad (3.4)$$

где суммарные активные $R_{\text{к}\Sigma}$ и индуктивные $X_{\text{к}\Sigma}$ сопротивления электрической цепи включают в себя следующие сопротивления, мОм:

$$R_{\text{к}\Sigma} = R_{\text{т}} + R_{\text{р}} + R_{\text{т.т}} + R_{\text{к.в}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{к}} + R_{\text{1кб}} + R_{\text{л}} + R_{\text{д}}, \quad (3.5)$$

$$X_{\Sigma} = X_c + X_T + X_p + X_{T.T} + X_{к.в} + X_{ш} + X_{1кб} + X_{л}. \quad (3.6)$$

Здесь X_c — рассчитанное по формулам (3.2) или (3.3) эквивалентное индуктивное сопротивление системы до понижающего трансформатора, мОм; X_T и R_T — индуктивное и активное сопротивление понижающего трансформатора, приведенное к ступени низшего напряжения, рассчитываемое по каталожным данным, мОм,

$$R_T = \frac{\Delta P_{кз} U_{Нном}^2}{S_{ном}^2},$$

$$X_T = \sqrt{\left(\frac{u_{к\%}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{кз}}{S_{ном}}\right)^2} \frac{U_{Нном}^2}{S_{ном}}. \quad (3.7)$$

Активное R_p и индуктивное X_p сопротивление реактора можно рассчитать через потери активной мощности в фазе реактора, номинальный ток, индуктивность катушки реактора и взаимную индуктивность между фазами реактора:

$$R_p = \frac{\Delta P_{ном}}{I_{ном}^2} 10^3,$$

$$X_p = \omega_{\text{синхр}}(L - M)10^3.$$

Значения активного $R_{T.T}$ и индуктивного $X_{T.T}$ сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока можно найти в прил. 5 ГОСТ Р 50270–92, там же в прил. 6 — активное $R_{к.в}$ и индуктивное $X_{к.в}$ сопротивление токовых катушек и переходных сопротивлений подвижных контактов автоматических выключателей.

В выражения (3.5) и (3.6) входят: активное $R_{ш}$ и индуктивное $X_{ш}$ сопротивление шинопроводов, мОм; $R_{1кб}$, $X_{1кб}$ — активное и индуктивное сопротивление прямой последовательности кабелей, мОм (ГОСТ Р 50270–92, прил. 2); $R_{л}$ и $X_{л}$ — активное и индуктивное сопротивление прямой последовательности проводов воздушных ЛЭП или проводов, проложенных открыто на изоляторах (ГОСТ Р 50270–92, прил. 3). Суммарное активное сопротивление R_k различных контактов и контактных соединений можно найти в прил. 4 к ГОСТ Р 50270–92, а приближенно принимать:

— для контактных соединений кабелей $R_k = 0,1$ мОм;

- для шинопроводов $R_k = 0,01$ мОм;
- коммутационных аппаратов $R_k = 1,0$ мОм.

Активное сопротивление дуги R_d в месте повреждения рассчитывается в зависимости от условий КЗ.

В том случае, когда возле места КЗ имеются синхронные и асинхронные двигатели или комплексная нагрузка, начальное действующее значение периодической составляющей надо определять как сумму токов от энергосистемы и электродвигателей и (или) комплексной нагрузки.

Расчет апериодической составляющей и ударного тока КЗ

В радиальных сетях апериодическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени определяют по формуле

$$i_a(t) = i_{a0} e^{-t/\tau_a},$$

где t — время, с; i_{a0} — начальное значение апериодической составляющей, $i_{a0} = \sqrt{2} \cdot I_{п0}$; τ_a — постоянная времени, с, $\tau_a = X_\Sigma / (\omega_{\text{син}} R_\Sigma)$. При этом следует рассчитывать апериодическую составляющую отдельно для каждой из радиальных независимых друг от друга ветвей, возникающих в расчетной схеме относительно точки КЗ.

Ударный ток трехфазного КЗ находится как

$$i_{уд} = \sqrt{2} I_{п0} \left(1 + e^{-\frac{0,01(0,5 + \varphi_k/\pi)}{\tau_a}} \right) \quad (3.8)$$

для одной ветви или как сумма ударных токов от отдельных независимых друг от друга частей схемы.

Учет синхронных и асинхронных электродвигателей при расчете токов КЗ в сетях до 1 кВ. При коротких замыканиях в сетях ниже 1 кВ синхронные двигатели в схемах замещения учитываются по своим сверхпереходным сопротивлениям по продольной оси x_d'' и сверхпереходной ЭДС $E_{сд}''$ (при расчете начального действующего значения тока КЗ). Для расчета постоянной времени затухания апериодической составляющей синхронные и асинхронные двигатели вводятся в схему замещения величиной индуктивного сопротивления обратной последовательности x_2 и активным сопротивлением обмотки статора $R_{сд}$. В приближенных расчетах $x_{d(*)}'' = 0,15$ о. е., $x_2 = x_d''$,

$R_{сд} = 0,15x_d''$. Сверхпереходную ЭДС синхронного двигателя определяют по выражению

$$E_{сд}'' = \sqrt{\left(\frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} \cos \varphi_{ном} + I_{ном} R_{сд}\right)^2 + \left(\frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} \sin \varphi_{ном} \pm I_{ном} x_d''\right)^2}, \quad (3.9)$$

где знак «+» ставится, если двигатель до замыкания работал в режиме перевозбуждения, а «-» — если в режиме недовозбуждения.

Ударный ток трехфазного КЗ от синхронного электродвигателя рассчитывается по формуле (3.8).

При наличии в схеме асинхронных двигателей следует учитывать их сверхпереходное индуктивное сопротивление $x_{ад}''$, а при необходимости и активное сопротивление $R_{ад}$. Величину сверхпереходной ЭДС можно определить по формуле (3.9), но использовать каталожные данные асинхронного электродвигателя.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока

$$I_{п0}^{ад} = \frac{E_{ад}''}{\sqrt{(x_{ад}'' + x_{1\Sigma})^2 + (R_{ад} + R_{1\Sigma})^2}}.$$

Ударный ток от асинхронного двигателя определяется с учетом затухания не только амплитуды апериодической, но и периодической составляющих.

Расчет значения тока КЗ в произвольный момент времени зависит от многих факторов, в т. ч. от способа электроснабжения (энергосистема, автономные источники), присутствия синхронных и асинхронных электродвигателей. Точный расчет необходимо выполнять путем решения системы дифференциальных уравнений или с помощью методики типовых кривых (см. подгл. 1.6). Без учета подпитки со стороны электродвигателей (при питании от энергосистемы через понижающий трансформатор) действующее значение периодической составляющей в произвольный момент времени можно найти как

$$I_{пт} = \frac{U_{ср.номН}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{x_{1\Sigma}^2 + (R_{1\Sigma}' + R_{дт} + R_{к6\theta t})^2}},$$

где $x_{1\Sigma}$ — суммарное индуктивное сопротивление прямой последовательности цепи; $R'_{1\Sigma}$ — суммарное активное сопротивление цепи без учета кабельных линий; R_{dt} — активное сопротивление дуги в месте КЗ в заданный момент времени; $R_{k6\theta t}$ — активное сопротивление кабельной линии к моменту времени t и с учетом нагрева током КЗ.

Учет сопротивления электрической дуги и теплового спада тока КЗ. Электрическая дуга, появляющаяся в месте КЗ, при расчете учитывается активным сопротивлением, величина которого связана с влиянием на ток КЗ устойчиво горящей дуги. Поскольку в каждом случае процесс горения дуги и ее характеристики в произвольный момент времени уникальны, среднее значение активного сопротивления дуги в начальный момент времени можно рассчитать по выражению

$$R_{д0}^{cp} = \sqrt{\frac{U_{cp.номH}^2}{3I_{п0}^2 K_c^2} - x_{1\Sigma}^2 - R_{1\Sigma}}, \quad (3.10)$$

где $I_{п0}$ — начальное действующее значение периодической составляющей тока в точке замыкания без учета дуги; K_c — среднестатистический поправочный коэффициент, который учитывает снижение тока в начальный момент за счет возникновения дуги (по сравнению с током металлического КЗ), зависит от вида КЗ и сопротивления Z_K , которое при трехфазном КЗ равно $Z_K = \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}$,

$$K_c = 0,6 - 0,0025Z_K + 0,114 \sqrt{Z_K} - 0,13 \sqrt[3]{Z_K}; \quad (3.11)$$

$R_{1\Sigma}$ и $x_{1\Sigma}$ — суммарное индуктивное и активное сопротивление прямой последовательности цепи.

Для того чтобы найти возможное минимальное или максимальное значение тока в начальный момент короткого дугового замыкания, приходится рассчитывать предельные значения сопротивлений дуги, которые, в свою очередь, зависят от значений поправочного коэффициента

$$K_c^{max} = 0,788 + 0,353 \cdot 10^{-2} Z_K - 0,21 \cdot 10^{-4} Z_K^2 + 0,45 \cdot 10^{-7} Z_K^3, \quad (3.12)$$

$$K_c^{\min} = 0,458 + 0,557 \cdot 10^{-2} Z_K - 0,247 \cdot 10^{-4} Z_K^2 + 0,39 \cdot 10^{-7} Z_K^3. \quad (3.13)$$

Величина сопротивления дуги в произвольный момент времени определяется неким средним значением, которое рассчитывается по формуле

$$R_{dt}^{\text{cp}} = \sqrt{\frac{U_{\text{ср.номН}}^2}{3I_{\text{пт}}^2 K_{ct}^2} - x_{1\Sigma}^2 - (R'_{1\Sigma} + R_{\text{кб}\theta t})}, \quad (3.14)$$

где $I_{\text{пт}}$ — действующее значение периодической составляющей тока металлического (без дуги) КЗ в произвольный момент времени с учетом увеличения активного сопротивления в цепи; $R'_{1\Sigma}$ — суммарное активное сопротивление цепи без учета кабельных линий, но без учета активного сопротивления кабельной или воздушной линии и сопротивления дуги; $R_{\text{кб}\theta t}$ — активное сопротивление кабельной или воздушной линии к моменту времени t и с учетом нагрева током КЗ. Коэффициент K_{ct} определяется по выражению

$$K_{ct} = 0,55 - 0,002 Z_{\text{кт}} + 0,1 \sqrt{Z_{\text{кт}}} - 0,12 \sqrt[3]{Z_{\text{кт}}}, \quad (3.15)$$

где $Z_{\text{кт}}$ — сопротивление цепи к моменту времени t , которое можно рассчитать по формуле $Z_{\text{кт}} = \sqrt{(R'_{1\Sigma} + R_{\text{кб}\theta t})^2 + x_{1\Sigma}^2}$.

Для нахождения вероятного значения тока в заданный момент времени сопротивление дуги считается в соответствии со значениями коэффициентов:

$$K_{ct}^{\max} = 0,661 + 0,319 \cdot 10^{-2} Z_{\text{кт}} - 0,127 \cdot 10^{-4} Z_{\text{кт}}^2 + 0,13 \cdot 10^{-7} Z_{\text{кт}}^3; \quad (3.16)$$

$$K_{ct}^{\min} = 0,339 + 0,745 \cdot 10^{-2} Z_{\text{кт}} - 0,484 \cdot 10^{-4} Z_{\text{кт}}^2 + 0,13 \cdot 10^{-7} Z_{\text{кт}}^3. \quad (3.17)$$

В распределительных сетях для линий, выполненных из ферромагнитных материалов (например, стальные провода марки ПС), активные и реактивные сопротивления являются функциями параметров режима, т. е. их величина зависит от тока, протекающего по проводу:

$$R = f_1(I) \text{ и } x_{\text{вн}} = f_2(I). \quad (3.18)$$

Здесь под $x_{\text{вн}}$ понимается внутренняя часть реактивного сопротивления рассматриваемого проводника, соответствующая доле магнитного потока, которая замыкается по самому проводнику. Зависимость параметров цепи R , x от параметров режима I обуславливает нелинейный характер распределительных сетей.

Характеристики (3.18) стандартизованы. Часто расчет сети можно выполнять приближенно. При токе $I = 100\text{--}200$ А используют средние значения активных, полных реактивных и полных сопротивлений соответствующих проводов [1]. При токе, превышающем 200 А, суммарное реактивное сопротивление проводов резко падает, поэтому $x \approx 0,5$ Ом/км.

Активное сопротивление сети должно определяться с учетом теплового спада тока. При протекании тока КЗ по проводнику его активное сопротивление увеличивается по причине нагрева, что приводит к снижению величины тока. Как уже упоминалось, данное явление называется тепловым спадом тока КЗ. В п. 1.7 было показано, что увеличение активного сопротивления можно определять с учетом или без учета теплоотдачи в окружающую среду — все зависит от цели расчета. Величина активного сопротивления к заданному моменту времени определяется с использованием коэффициента K_θ , зависящего от материала и температуры проводника по формуле (1.16) со с. 42:

$$R_{\theta t} = R_{\text{нач}} K_\theta,$$

где $R_{\text{нач}}$ определяется по формуле (1.14) со с. 42, а K_θ — по формуле (1.17) со с. 45 для металлических КЗ.

Если рассматривать дуговые устойчивые замыкания, то для оценки K_θ можно использовать кривые, показанные на рис. 3.4 при выполнении следующих условий: схема является радиальной, ЭДС источника можно считать неизменной по амплитуде, значение температуры кабеля меняется от начального $\theta_{\text{нач}} = 20$ °С до допустимого к моменту отключения КЗ $\theta_{\text{к,доп}} = 200$ °С, продолжительность КЗ до момента отключения составляет 0,2; 0,5; 1; 1,5 с.

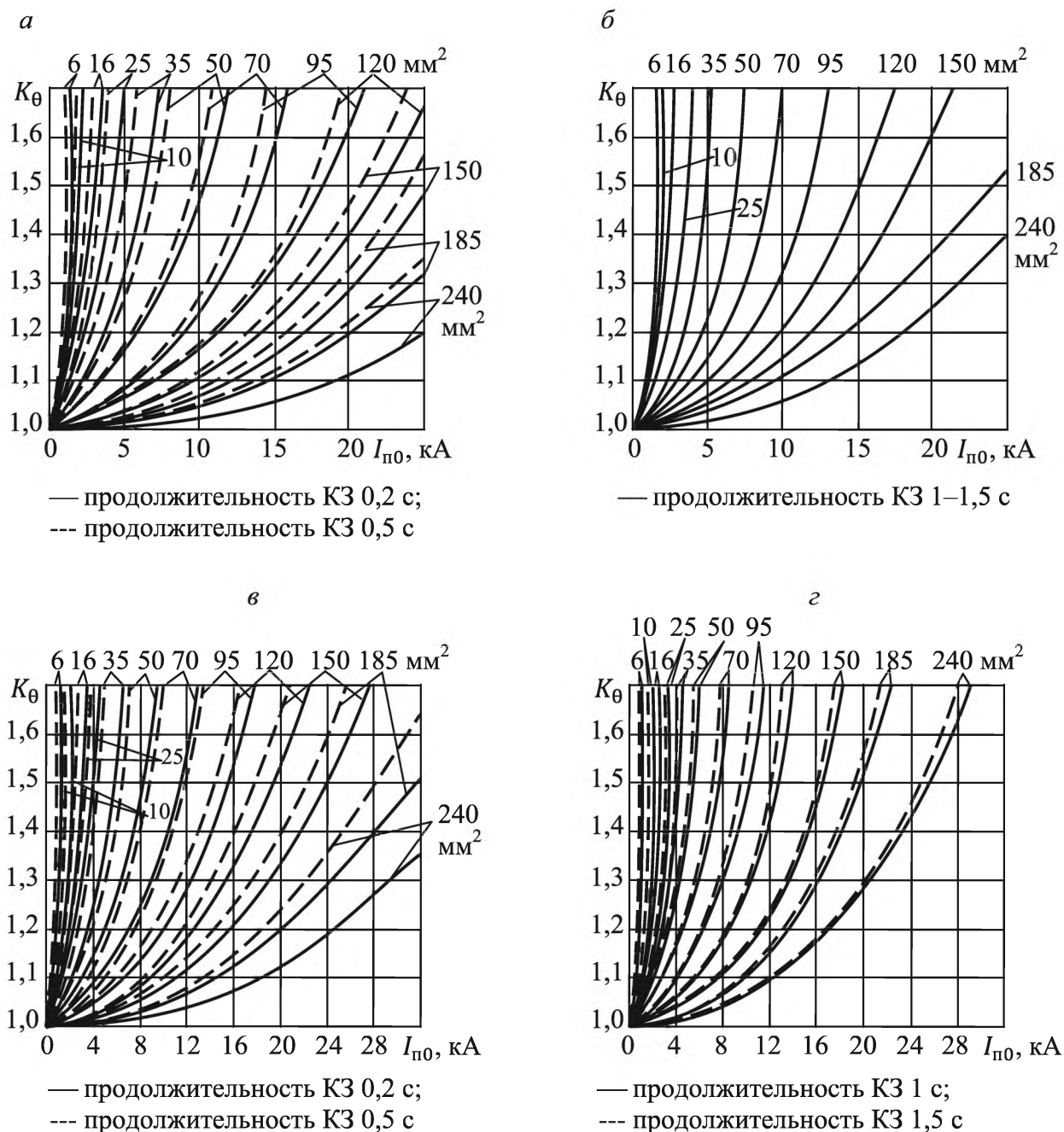


Рис. 3.4. Коэффициент K_θ увеличения активного сопротивления КЛ различного сечения с алюминиевыми (*a*, *б*) и медными (*в*, *г*) жилами от тока дугового устойчивого КЗ с учетом теплоотдачи при различной продолжительности КЗ

Учет местных источников питания. В распределительных сетях и сетях электроснабжения имеются свои источники питания. Для расчета таких сетей можно применять все ранее изученные методы, учитывая ряд особенностей:

- в точках присоединения распределительной сети к основной сети системы напряжение можно считать практически постоянным

- ным при любых нарушениях режима распределительной сети; таким образом, при наличии местных источников следует рассматривать простейшую схему с двумя генераторными ветвями — систему с местным источником;
- если в качестве местного источника рассматриваются шины генераторного напряжения достаточно крупных электростанций, то напряжение на этих шинах при нарушении режима в распределительной сети также можно считать приблизительно постоянным. Обычно линии, отходящие от шин генераторного напряжения, реагируются с целью уменьшить токи КЗ, в схеме питания распределительной сети появляется большое сопротивление x_L , за которым напряжение может считаться постоянным;
 - при анализе распределения токов в ветвях системы электропитания обычно используют метод наложения, рассматривая аварийный режим как результат наложения собственно аварийного режима на нормальный режим; при этом для оценки собственно аварийного режима исходят из схем замещения, составленных для сверхпереходного режима;
 - учитывать наличие батарей статических конденсаторов, предназначенных для генерации реактивной мощности Q (увеличение $\cos \varphi$): существуют специальные схемы включения конденсаторов, в которых в цепи конденсаторной батареи имеется значительная индуктивность, специально вводимая для ограничения токов или как средство фильтрации высших гармоник; в этом случае конденсаторную батарею надо учитывать как независимый источник тока КЗ. При малой индуктивности между точкой КЗ и батареей влиянием батареи на ток КЗ можно пренебречь, поскольку ток от батареи быстро снижается до нуля.

Расчетные примеры к главе 3

Пример 1

Определить ток простого замыкания на землю, возникающего на шинах понижающей подстанции с разветвленной кабельной сетью. Известно $U_H = 35$ кВ, эквивалентное емкостное сопротивление нулевой последовательности кабельных линий $x_{0c} = 4250$ Ом. Предусмотреть, если необходимо, установку дугогасящего аппарата.

Расчет проводится в соответствии со схемой соединений последовательностей для $K^{(1)}$ (см. рис. 2.17, а со с. 97). Шины трансформатора можно считать источником бесконечной мощности с $U_{\text{ф.ср}} = U_{\text{ср}}/\sqrt{3} = 37/\sqrt{3} = 21,3$ кВ.

Учитывая формулу (3.2) и пренебрегая сопротивлениями $Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$, x_{0L} , которые малы по сравнению с x_{0C} , получаем

$$i_{A1}^{(1)} = \frac{U_{\text{ф.ср}}}{-jx_{0C}} = \frac{21,3}{-j \cdot 4250} = j \cdot 0,005 \text{ кА};$$

$$i_{A1}^{(1)} = i_{A0}^{(1)} = i_{A2}^{(1)} = j \cdot 5 \text{ А.}$$

Ток в поврежденной фазе

$$i_A^{(1)} = i_{A1}^{(1)} + i_{A0}^{(1)} + i_{A2}^{(1)} = 3j \cdot 5 = j \cdot 15 \text{ А.}$$

Поскольку значение емкостного тока превышает 10 А, то требуется предусмотреть установку дугогасящего реактора. Его сопротивление рассчитывается из условия резонанса токов, когда

$$z_{\Sigma} = \left(\frac{1}{3jx_L} + \frac{1}{-jx_{0C}} \right)^{-1} = \infty$$

и $x_L = x_{0C}/3 = 4250/3 = 1416,7 \text{ Ом.}$

Пример 2

Определить ток металлического однофазного замыкания в сети 35 кВ, имеющей воздушные линии протяженностью 200 км.

Конструктивное исполнение линии АС-95: фазные провода лежат в вершинах треугольника со сторонами $d_{ab} = 4,06$ м, $d_{ac} = 3,5$ м, $d_{bc} = 3,09$ м. Высота подвеса проводов: $h_a = h_c = 8$ м, $h_b = 11$ м.

Для заданных проводов линии определяется радиус одного провода и среднее геометрическое расстояние между фазными проводами:

$$R_{\Sigma} = 6,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}, D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{4,06 \cdot 3,5 \cdot 3,09} = 3,53 \text{ м},$$

– тогда средний геометрический радиус провода равен

$$R_{\Sigma, \text{ср}} = \sqrt[3]{R_{\Sigma} D_{\text{ср}}^2} = \sqrt[3]{6,75 \cdot 10^{-3} \cdot 3,53^2} = 0,44 \text{ м.}$$

Среднее расстояние проводов фаз a , b и c до их зеркальных отображений относительно земли $D_{\text{ср}i} = 2 \cdot (8 + 8 + 11)/3 = 18$ м.

Емкостное реактивное сопротивление 1 км линии равно

$$x_{0C}^0 = 396 \log(D_3/R_{3\text{ср}}) \cdot 10^3,$$

тогда $x_{0C}^0 = 396 \log(18/0,44) \cdot 10^3 = 636 \cdot 10^3$ Ом·км и соответственно емкостное сопротивление всей сети $x_{0C} = 636 \cdot 10^3/200 = 3180$ Ом.

Искомый ток замыкания на землю составляет

$$i_3 = 3 \frac{U_{\text{ф.ср}}}{-jx_{0C}} = 3 \frac{37 \cdot 10^3}{\sqrt{3}(-j3180)} = j20 \text{ А},$$

что превышает допустимый емкостный ток простого замыкания. В данном случае, чтобы скомпенсировать ток замыкания на землю, нужно нейтраль обмотки 35 кВ трансформатора заземлить через катушку с индуктивным сопротивлением $x_L = 3180/3 = 1060$ Ом.

Пример 3

Рассчитать вероятные максимальное и минимальное значения тока трехфазного КЗ в начальный момент времени и к моменту его отключения 0,5 с. Схема сети приведена на рис. 3.5.

Исходные данные:

- система – $S_K = 150$ МВА, $U_{\text{ср.номВ}} = 6$ кВ;
- трансформатор ТСЗС-1000/6 – $U_{\text{Вном}} = 6,3$ кВ, $U_{\text{Нном}} = 0,4$ кВ, $u_{k\%} = 8$ %, $\Delta P_{\text{кз}} = 11,2$ кВт;
- шинопровод ШМА-4-1600 – $\ell_{\text{ш}} = 15$ м, $R_{1\text{ш}} = 0,03$ мОм/м, $X_{1\text{ш}} = 0,014$ мОм/м;
- автоматический выключатель В-1 «Электрон» – $I_{\text{ном}} = 1000$ А, сопротивления контактов $R_{\text{к.В1}} = 0,25$ мОм, $X_{\text{к.В1}} = 0,1$ мОм;
- автоматический выключатель В-2 АЗ794С – $I_{\text{ном}} = 400$ А, $R_{\text{к.В2}} = 0,65$ мОм, $X_{\text{к.В2}} = 0,17$ мОм;
- кабельная линия КЛ-1 АВВГ-3×185-1×70 – $\ell_{\text{кл1}} = 50$ м, $R_{1\text{кл1}} = 0,208$ мОм/м, $X_{1\text{кл1}} = 0,063$ мОм/м;
- силовая сборка – болтовые контактные соединения $R_K = 0,003$ мОм, количество $n = 10$;

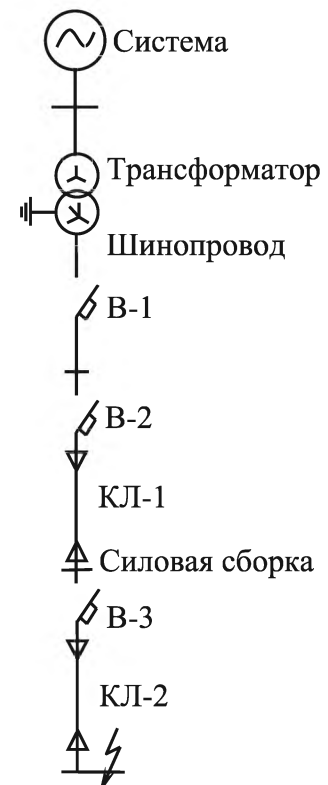


Рис. 3.5. Расчетная схема к примеру 3

- автоматический выключатель В-3 АЕ2056 – $I_{\text{ном}} = 100 \text{ А}$, $R_{\text{к.вз}} = 2,15 \text{ мОм}$, $X_{\text{к.вз}} = 1,2 \text{ мОм}$;
- кабельная линия КЛ-2 АВВГ-3×35-1×16 – $\ell_{\text{кл2}} = 20 \text{ м}$, $R_{1\text{кл2}} = 1,1 \text{ мОм/м}$, $X_{1\text{кл2}} = 0,068 \text{ мОм/м}$.

Решение. Система электроснабжения в данном примере радиальная от энергосистемы (нет автономных источников, синхронных и асинхронных электродвигателей).

Значения параметров схемы замещения:

- сопротивление системы согласно формуле (3.2)

$$X_{\text{с}} = \frac{U_{\text{ср.номн}}^2}{S_{\text{к}}} 10^{-3} = \frac{400^2}{150} 10^{-3} = 1,067 \text{ мОм};$$

- сопротивления трансформатора по формуле (3.7)

$$R_{\text{т}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} U_{\text{нном}}^2}{S_{\text{ном}}^2} = \frac{11,2 \cdot 400^2}{1000^2} = 1,792 \text{ мОм},$$

$$\begin{aligned} X_{\text{т}} &= \sqrt{\left(\frac{u_{\text{к\%}}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{\text{кз}}}{S_{\text{ном}}}\right)^2} \cdot \frac{U_{\text{нном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{8}{100}\right)^2 - \left(\frac{11,2}{1000}\right)^2} \cdot \frac{400^2}{1000} = 12,67 \text{ мОм}. \end{aligned}$$

Активное и индуктивное сопротивления шинпровода:

$$R_{\text{ш}} = R_{1\text{ш}} \ell_{\text{ш}} = 0,03 \cdot 15 = 0,45 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{ш}} = X_{1\text{ш}} \ell_{\text{ш}} = 0,014 \cdot 15 = 0,21 \text{ мОм}.$$

Активное сопротивление болтовых контактных соединений

$$R_{\text{к.экв}} = n R_{\text{к}} = 10 \cdot 0,003 = 0,03 \text{ мОм}.$$

Для первой кабельной линии сопротивления равны

$$R_{\text{кл1}} = R_{1\text{кл1}} \ell_{\text{кл1}} = 0,208 \cdot 50 = 10,4 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{кл1}} = X_{1\text{кл1}} \ell_{\text{кл1}} = 0,063 \cdot 50 = 3,15 \text{ мОм}$$

для второй —

$$R_{\text{кл}_2} = R_{1\text{кл}_2} \ell_{\text{кл}_2} = 1,1 \cdot 20 = 22 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{кл}_2} = X_{1\text{кл}_2} \ell_{\text{кл}_2} = 0,068 \cdot 20 = 1,36 \text{ мОм}.$$

Суммарные сопротивления относительно точки КЗ (для определения тока КЗ в начальный момент времени) составляют

$$\begin{aligned} R_{1\Sigma} &= R_{\text{Т}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{к.в1}} + R_{\text{к.в2}} + R_{\text{кл}_1} + R_{\text{к.экв}} + R_{\text{к.в3}} + R_{\text{кл}_2} = \\ &= 1,79 + 0,45 + 0,25 + 0,65 + 10,4 + 0,03 + 2,15 + 22 = \\ &= 37,72 \text{ мОм}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{1\Sigma} &= X_{\text{Т}} + X_{\text{ш}} + X_{\text{к.в1}} + X_{\text{к.в2}} + X_{\text{кл}_1} + X_{\text{к.в3}} + X_{\text{кл}_2} = \\ &= 12,67 + 0,21 + 0,1 + 0,17 + 3,15 + 1,2 + 1,36 = 18,86 \text{ мОм}. \end{aligned}$$

В таком случае начальное действующее значение (оно же максимально возможное) периодической составляющей тока металлического КЗ по формуле (3.4) определяется как

$$I_{\text{п0}} = \frac{U_{\text{ср.номН}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{37,72^2 + 18,86^2}} = 5,48 \text{ кА}.$$

Для расчета тока КЗ, протекающего с горением дуги, вычислим наиболее вероятное значение (среднее) активного сопротивления дуги в начальный момент времени, а также максимальное и минимальное значение. Поскольку $Z_{\text{к}} = \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2} = \sqrt{37,72^2 + 18,86^2} = 42,17 \text{ Ом}$, то значения поправочного коэффициента по формулам (3.11)–(3.13)

$$K_{\text{с}} = 0,6 - 0,0025 \cdot 42,17 + 0,114 \cdot \sqrt{42,17} - 0,13 \cdot \sqrt[3]{42,17} = 0,782;$$

$$\begin{aligned} K_{\text{с}}^{\text{max}} &= 0,788 + 0,353 \cdot 10^{-2} \cdot 42,17 - 0,21 \cdot 10^{-4} \cdot 42,17^2 + \\ &+ 0,45 \cdot 10^{-7} \cdot 42,17^3 = 0,903; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{\text{с}}^{\text{min}} &= 0,458 + 0,557 \cdot 10^{-2} \cdot 42,17 - 0,247 \cdot 10^{-4} \cdot 42,17^2 + \\ &+ 0,39 \cdot 10^{-7} \cdot 42,17^3 = 0,652. \end{aligned}$$

Тогда по выражению (3.10) вероятные среднее, максимальное и минимальное значения сопротивления дуги в начальный момент

времени будут соответственно:

$$R_{д0}^{cp} = \sqrt{\frac{400^2}{3 \cdot 5,48^2 \cdot 0,782^2} - 18,86^2 - 37,72} = 12,76 \text{ мОм};$$

$$R_{д0}^{max} = \sqrt{\frac{400^2}{3 \cdot 5,48^2 \cdot 0,652^2} - 18,86^2 - 37,72} = 24,1 \text{ мОм};$$

$$R_{д0}^{min} = \sqrt{\frac{400^2}{3 \cdot 5,48^2 \cdot 0,902^2} - 18,86^2 - 37,72} = 5,03 \text{ мОм}.$$

Действующее значение периодической составляющей тока КЗ, протекающего с горением дуги, в начальный момент времени в среднем равно

$$\begin{aligned} I_{п0}^{д.ср} &= \frac{U_{ср.номН}}{\sqrt{3} \sqrt{x_{1\Sigma}^2 + (R_{1\Sigma} + R_{дt})^2}} = \\ &= \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{18,86^2 + (37,72 + 12,76)^2}} = 4,29 \text{ кА}, \end{aligned}$$

максимальное и минимальное значения того же тока соответственно

$$I_{п0}^{д.маx} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{18,86^2 + (37,72 + 5,03)^2}} = 4,95 \text{ кА},$$

$$I_{п0}^{д.миn} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{18,86^2 + (37,72 + 24,1)^2}} = 3,57 \text{ кА}.$$

Далее рассчитаем действующее значение периодической составляющей тока КЗ к моменту его отключения, т. е. через 0,5 с. К этому моменту времени за счет нагрева изменятся активные сопротивления кабельных линий КЛ-1 и КЛ-2, а также изменится сопротивление дуги. Активное сопротивление сети без учета кабельных линий составляет

$$R'_{1\Sigma} = R_{1\Sigma} - R_{кл1} - R_{кл2} = 37,72 - 10,4 - 22 = 5,32 \text{ мОм}.$$

Для определения сопротивлений кабельных линий к моменту отключения замыкания необходимо знать конечную температуру каждого кабеля. Сначала выясним, надо ли учитывать теплоотдачу в изоляцию, для этого по формуле (1.21) со с. 46 определим критическую продолжительность КЗ для кабельных линий с алюминиевыми жилами

$$t_{\text{откл.кр}}^{\text{кл1}} = 0,65 \cdot 10^{-2} S_{\text{кл1}} = 0,65 \cdot 10^{-2} \cdot 185 = 1,2 \text{ с},$$

$$t_{\text{откл.кр}}^{\text{кл2}} = 0,65 \cdot 10^{-2} S_{\text{кл2}} = 0,65 \cdot 10^{-2} \cdot 35 = 0,23 \text{ с}.$$

Поскольку для КЛ-2 $t_{\text{откл}} > t_{\text{откл.кр}}^{\text{кл2}}$, постольку теплоотдачу в изоляцию учитывать необходимо, что выполняется при помощи коэффициента ε (см. формулу (1.22) на с. 46), учитывающего отвод тепла в изоляцию. Кабель марки АВВГ имеет алюминиевую токопроводящую жилу с изоляцией из ПВХ (пластикат), тогда для КЛ-1 (коэффициенты берутся из табл. 1.6 со с. 47)

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{кл1}} &= \sqrt{1 + FA \sqrt{\frac{t_{\text{отк}}}{S}} + F^2 B \frac{t_{\text{отк}}}{S}} = \\ &= \sqrt{1 + 0,7 \cdot 0,575 \cdot \sqrt{\frac{0,5}{185}} + 0,7^2 \cdot 0,166 \cdot \frac{0,5}{185}} = 1,011 \end{aligned}$$

и КЛ-2

$$\varepsilon_{\text{кл2}} = \sqrt{1 + 0,7 \cdot 0,575 \cdot \sqrt{\frac{0,5}{35}} + 0,7^2 \cdot 0,166 \cdot \frac{0,5}{35}} = 1,024.$$

Конечная температура проводника (с учетом теплоотдачи в изоляцию) при металлическом коротком замыкании определяется по формуле (1.22) со с. 46, и так как изменение действующего значения периодической составляющей тока КЗ с течением времени не учитывается (источник ЭДС бесконечной мощности), то

$$\begin{aligned}\theta_{\text{кон}}^{\text{кл1}} &= (\theta_{\text{нач}} + \beta) e^{\frac{I_{\text{нт}}^2 t_{\text{отк}}}{K_1^2 S^2 \epsilon^2}} - \beta = \\ &= (20^\circ + 228^\circ) \exp\left(\frac{(5,48 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,5}{148^2 \cdot 185^2 \cdot 1,011^2}\right) - 228^\circ = 24,9^\circ; \\ \theta_{\text{кон}}^{\text{кл2}} &= (20^\circ + 228^\circ) \exp\left(\frac{(5,48 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,5}{148^2 \cdot 35^2 \cdot 1,024^2}\right) - 228^\circ = 194,9^\circ.\end{aligned}$$

Коэффициенты увеличения активного сопротивления каждого кабеля по формуле (1.20)

$$\begin{aligned}K_{\theta}^{\text{кл1}} &= \frac{\theta_{\text{ус}} + \theta_{\text{кон}}^{\text{кл1}}}{\theta_{\text{ус}} + \theta_{\text{нач}}} = \frac{236 + 24,9}{236 + 20} = 1,019; \\ K_{\theta}^{\text{кл2}} &= \frac{\theta_{\text{ус}} + \theta_{\text{кон}}^{\text{кл2}}}{\theta_{\text{ус}} + \theta_{\text{нач}}} = \frac{236 + 194,9}{236 + 20} = 1,683,\end{aligned}$$

соответственно сами сопротивления по выражению (1.19)

$$\begin{aligned}R_{\text{кл1}\theta t} &= K_{\theta}^{\text{кл1}} R_{\text{кл1}} = 1,019 \cdot 10,4 = 10,6 \text{ мОм}, \\ R_{\text{кл2}\theta t} &= K_{\theta}^{\text{кл2}} R_{\text{кл2}} = 1,683 \cdot 22 = 37,026 \text{ мОм}.\end{aligned}$$

Величина периодической составляющей тока КЗ к моменту отключения с учетом нагрева кабельных линий, но без учета дуги будет равна

$$\begin{aligned}I_{\text{нт}} &= \frac{U_{\text{ср.номН}}}{\sqrt{3} \sqrt{x_{1\Sigma}^2 + (R'_{1\Sigma} + R_{\text{кл1}\theta t} + R_{\text{кл2}\theta t})^2}} = \\ &= \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{18,86^2 + (5,32 + 10,6 + 37,026)^2}} = 4,11 \text{ кА}.\end{aligned}$$

Сопротивление электрической дуги к моменту отключения КЗ изменится и будет составлять согласно формуле (3.14)

$$R_{dt} = \sqrt{\frac{400^2}{400 \cdot 4,11^2 \cdot 0,73^2} - 18,86^2 - (5,32 + 10,6 + 37,026)} =$$

$$= 21,7 \text{ мОм},$$

при этом коэффициент в формуле (3.15) составляет

$$K_{ct} = 0,55 - 0,002 \cdot 56,2 + 0,1 \sqrt{56,2} - 0,12 \sqrt[3]{56,2} = 0,73,$$

$$\text{т. к. } Z_{kt} = \sqrt{18,86^2 + (5,32 + 10,6 + 37,026)^2} = 56,2 \text{ мОм}.$$

По рис. 3.4, а (с. 143) находим соответствующие коэффициенты увеличения активного сопротивления кабельных линий от тока дугового устойчивого КЗ, тогда с учетом теплоотдачи для КЛ-1 $K_{\theta}^{\text{кл}1} = 1,01$ и для КЛ-2 $K_{\theta}^{\text{кл}2} = 1,5$. В таком случае среднее значение периодической составляющей тока дугового КЗ с учетом влияния нагрева к моменту отключения будет равно

$$I_{nt}^{\text{д.ср}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{18,86^2 + (5,32 + 1,01 \cdot 10,4 + 1,5 \cdot 22 + 21,7)^2}} =$$

$$= 3,16 \text{ кА}.$$

Вероятно возможные максимальное и минимальное значения тока к заданному моменту времени определяются с использованием выражений (3.16), (3.17), (3.14).

$$K_{ct}^{\text{max}} = 0,661 + 0,319 \cdot 10^{-2} \cdot 56,2 - 0,127 \cdot 10^{-4} \cdot 56,2^2 +$$

$$+ 0,13 \cdot 10^{-7} \cdot 56,2^3 = 0,802;$$

$$K_{ct}^{\text{min}} = 0,339 + 0,745 \cdot 10^{-2} \cdot 56,2 - 0,484 \cdot 10^{-4} \cdot 56,2^2 +$$

$$+ 0,13 \cdot 10^{-7} \cdot 56,2^3 = 0,607;$$

$$R_{dt}^{\text{max}} = \sqrt{\frac{400^2}{3 \cdot 4,11^2 \cdot 0,607^2} - 18,86^2 - (5,32 + 10,6 + 37,026)} =$$

$$= 37,7 \text{ мОм};$$

$$R_{dt}^{\min} = \sqrt{\frac{400^2}{3 \cdot 4,11^2 \cdot 0,802^2} - 18,86^2 - 52,946} = 14,5 \text{ мОм};$$

$$I_{пт}^{\text{д. max}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{18,86^2 + (5,32 + 1,01 \cdot 10,4 + 1,5 \cdot 22 + 14,5)^2}} = 3,5 \text{ кА};$$

$$I_{пт}^{\text{д. min}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{18,86^2 + (5,32 + 1,01 \cdot 10,4 + 1,5 \cdot 22 + 37,7)^2}} = 2,61 \text{ кА}.$$

Вопросы для самопроверки

1. Каковы основные особенности расчета токов КЗ в сетях напряжением 3–35 кВ?
2. Дайте определение простого замыкания на землю.
3. Почему для простого замыкания и КЗ в сетях напряжением до 1000 В рекомендуется учитывать сопротивление дуги в точке повреждения?
4. Каковы основные особенности расчета КЗ в сетях напряжением до 1 кВ?
5. Как учитываются синхронные и асинхронные электродвигатели при расчете тока КЗ в сетях напряжением до 1 кВ?

4. АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ТРЕХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ НА ВЫВОДАХ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Когда в энергосистеме происходит тот или иной вид КЗ, невозможно выполнить анализ переходного процесса без знания поведения синхронного генератора (СГ). СГ определяет характер и время переходного процесса в электрической системе, поэтому следует знать, как протекает переходный процесс в самом СГ. До проведения расче-

тов необходимо определиться с математической моделью рассматриваемого элемента электрической сети, т. е. найти такую совокупность уравнений, математических соотношений, которая с достаточной степенью точности описывает процессы в данном элементе или его состояние. Схема замещения элемента является следствием его математической модели. Для синхронного генератора математическая модель создается с учетом следующих допущений:

- магнитная система машины считается *ненасыщенной*. Намагниченность стали статора и ротора принимается постоянной, поэтому индуктивности машины не зависят от токов;
- величины индуктивностей определяются для некоторого значения магнитной проницаемости стали магнитопровода. Считается, что магнитная проницаемость стали велика и постоянна;
- в синхронном генераторе отсутствуют все нелинейные эффекты (гистерезис, потери на вихревые токи, не учитывается явление вытеснения тока в проводниках машины);
- все механические потери мощности в СГ отсутствуют либо постоянны;
- в воздушном зазоре СГ магнитодвижущая сила распределена строго синусоидально, т. е. рассматривается только первая гармоническая составляющая. Наведенные в фазах статора генератора ЭДС тоже синусоидальны (выражаются синусоидами основной частоты);
- фазные обмотки статора выполнены симметрично. Ротор симметричен относительно своих продольной и поперечной осей;
- демпфирующие контуры как в продольной, так и в поперечной осях заменяются соответствующей эквивалентной обмоткой;
- скорость вращения ротора СГ в течение рассматриваемого переходного процесса постоянна и равна синхронной.

Наличие перечисленных выше допущений позволяет существенно упростить математическое описание СГ.

4.1. Физическая модель синхронной машины

Для принятых условий синхронный генератор можно представить линейной моделью, все контуры которой имеют между собой электромагнитную связь и показаны на рис. 4.1.

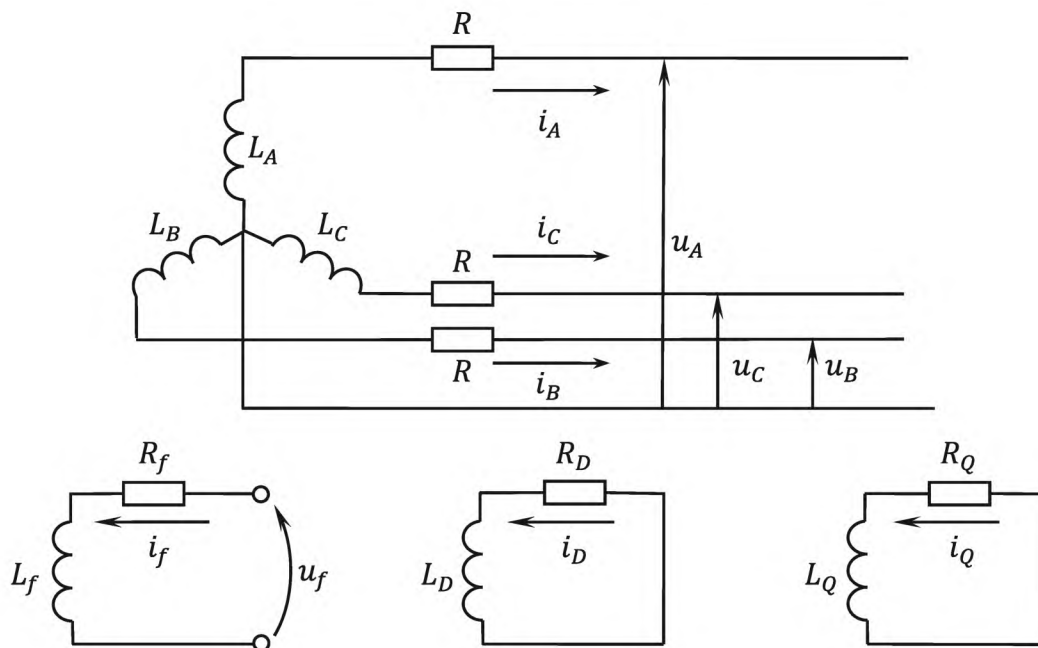


Рис. 4.1. Электромагнитные контуры «идеальной» синхронной машины

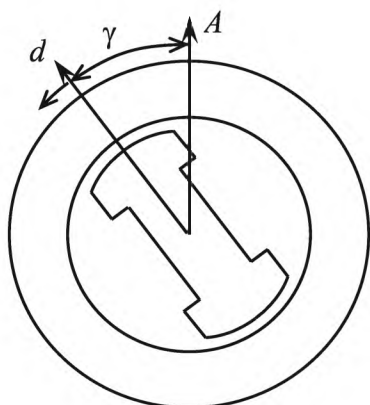


Рис. 4.2. Положение ротора в расточке статора

Угол γ или угол поворота ротора отсчитывается от неподвижной фазы A статора (магнитной оси фазы A) и до продольной оси ротора D в направлении его вращения и характеризует положение ротора в расточке статора (рис. 4.2). При вращении ротора за время dt угол γ изменится на величину $d\gamma = \omega dt$. К произвольному моменту времени t угол γ определяется из выражения $\gamma = \int_0^t \omega dt + \gamma_0$, где γ_0 — начальное значение угла γ при $t = 0$.

Если угловая частота вращения ротора $\omega = \omega_0 = 2\pi f$ постоянна, то угол изменяется по закону $\gamma = \omega_0 t + \gamma_0$. При условии, что число пар полюсов $p = 1$, механическая и электрическая угловые скорости совпадают.

Предположим, что к обмотке возбуждения приложено постоянное напряжение u_f от возбудителя, тогда по данной обмотке протекает постоянный ток i_f , который создает постоянный магнитный поток Φ_f , вращающийся со скоростью ω . Магнитный поток Φ_f обмотки возбуждения, сцепляясь с обмотками статора, индуцирует в них ЭДС, которые при наличии нагрузки создают в обмотках статора фазные токи i_A, i_B, i_C . Любой режим, как установившийся, так и переходный,

определяется мгновенными значениями токов, потокосцеплений контуров и напряжений на выводах обмотки статора.

В установившемся режиме работы СМ в обмотках статора протекают установившиеся периодические синусоидальные токи, амплитуда и фаза которых постоянны, т. е. они являются токами прямой последовательности. Вращающиеся магнитные поля токов статора и обмотки возбуждения имеют постоянные амплитуды и неподвижны относительно ротора. В демпферных контурах токи отсутствуют.

Уравнения, связывающие мгновенные значения величин в произвольный момент времени, — это уравнения второго закона Кирхгофа (для статорных обмоток направление тока от выводов в сеть, для роторных — наоборот). Они являются линейными дифференциальными уравнениями, поэтому потокосцепление любого контура может быть представлено как функция всех контурных токов

$$\begin{aligned}
 u_A &= -\frac{d\psi_A}{dt} - R_A i_A; & u_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + R_f i_f; \\
 u_B &= -\frac{d\psi_B}{dt} - R_B i_B; & 0 &= -\frac{d\psi_D}{dt} - R_D i_D; \\
 u_C &= -\frac{d\psi_C}{dt} - R_C i_C; & 0 &= -\frac{d\psi_Q}{dt} - R_Q i_Q.
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\psi_\alpha = \sum_{\beta} L_{\alpha\beta} \cdot i_\beta,$$

где $\alpha, \beta = A, B, C, f, D, Q$,
т. е.

$$\begin{aligned}
 \psi_A &= L_{AA} i_A + L_{AB} i_B + L_{AC} i_C + L_{Af} i_f + L_{AD} i_D + L_{AQ} i_Q, \\
 \psi_B &= L_{BA} i_A + L_{BB} i_B + L_{BC} i_C + L_{Bf} i_f + L_{BD} i_D + L_{BQ} i_Q, \\
 \psi_C &= L_{CA} i_A + L_{CB} i_B + L_{CC} i_C + L_{Cf} i_f + L_{CD} i_D + L_{CQ} i_Q, \\
 \psi_f &= L_{fA} i_A + L_{fB} i_B + L_{fC} i_C + L_{ff} i_f + L_{fD} i_D + L_{fQ} i_Q, \\
 \psi_D &= L_{DA} i_A + L_{DB} i_B + L_{DC} i_C + L_{Df} i_f + L_{DD} i_D + L_{DQ} i_Q, \\
 \psi_Q &= L_{QA} i_A + L_{QB} i_B + L_{QC} i_C + L_{Qf} i_f + L_{QD} i_D + L_{QQ} i_Q.
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Всего в СГ представлено шесть контуров, поэтому для них можно записать шесть уравнений для напряжений (4.1) и шесть уравнений для потокосцеплений (4.2). Всего полная система содержит 12 уравнений. В соответствии с принципом взаимности коэффициенты взаимной индукции (и самоиндукции) контуров равны $L_{\alpha\beta} = L_{\beta\alpha}$.

В векторно-матричной форме записи исходные системы уравнений для фаз статора преобразуются в систему вида

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = -\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

или

$$\vec{u}_a = -\frac{d}{dt} \vec{\Psi}_a - R \vec{i}_a, \quad (4.3)$$

где индекс a — признак статора. Вместо системы (4.2) для потокосцеплений статора и ротора (индекс r) можно записать

$$\begin{aligned} \vec{\Psi}_a &= [L_{aa}] \vec{i}_a + [L_{ar}] \vec{i}_r, \\ \vec{\Psi}_r &= [L_{ra}] \vec{i}_a + [L_{rr}] \vec{i}_r, \end{aligned} \quad (4.4)$$

где L_{aa} — матрица статорных индуктивностей, отражающая взаимную индукцию между контурами «статор–статор»; L_{ar} — матрица индуктивностей «статор–ротор», $[L_{ra}] = [L_{ar}]^T$. Матрица индуктивностей «ротор–ротор» $[L_{rr}]$ содержит либо нули, либо константы. Данное утверждение легко объясняется тем, что роторные обмотки $\{f, D \rightarrow d; Q \rightarrow q\}$ расположены в разных осях, следовательно, никакого магнитного взаимодействия между ними быть не может, тогда $L_{fQ} = L_{DQ} = L_{Qf} = L_{QD} = 0$. Взаимное положение роторных обмоток относительно друг друга не меняется, индуктивности $L_{ff}, L_{QQ}, L_{DD}, L_{fD}, L_{Df}$ постоянны, т. е. не зависят от положения ротора в расточке статора. Элементный состав всех матриц индуктивности приведен ниже.

Матрица

Описание коэффициентов — индуктивностей СМ

$$\begin{aligned}
 [L_{rr}] & \dots\dots\dots \begin{bmatrix} L_{ff} = \text{const} & L_{fD} = \text{const} & 0 \\ L_{Df} = \text{const} & L_{DD} = \text{const} & 0 \\ 0 & 0 & L_{QQ} = \text{const} \end{bmatrix} \\
 [L_{ar}] & \dots\dots\dots \begin{bmatrix} L_{Af}^m \cos \gamma & L_{AD}^m \cos \gamma & L_{AQ}^m \sin \gamma \\ L_{Bf}^m \cos(\gamma - 120^\circ) & L_{BD}^m \cos(\gamma - 120^\circ) & L_{BQ}^m \sin(\gamma - 120^\circ) \\ L_{Cf}^m \cos(\gamma + 120^\circ) & L_{CD}^m \cos(\gamma + 120^\circ) & L_{CQ}^m \sin(\gamma + 120^\circ) \end{bmatrix} \\
 [L_{ra}] & \dots\dots\dots \begin{bmatrix} L_{fA}^m \cos \gamma & L_{fB}^m \cos(\gamma - 120^\circ) & L_{fC}^m \cos(\gamma + 120^\circ) \\ L_{DA}^m \cos \gamma & L_{DB}^m \cos(\gamma - 120^\circ) & L_{DC}^m \cos(\gamma + 120^\circ) \\ L_{QA}^m \sin \gamma & L_{QB}^m \sin(\gamma - 120^\circ) & L_{QC}^m \sin(\gamma + 120^\circ) \end{bmatrix} \\
 [L_{aa}] & \begin{bmatrix} L_{AA}^{(0)} + L_{AA}^{(m2)} \cos(2\gamma) & -L_{AB}^{(0)} + L_{AB}^{(m2)} \cos(2\gamma - 120^\circ) & -L_{AC}^{(0)} + L_{AC}^{(m2)} \cos(2\gamma + 120^\circ) \\ -L_{BA}^{(0)} + L_{BA}^{(m2)} \cos(2\gamma - 120^\circ) & L_{BB}^{(0)} + L_{BB}^{(m2)} \cos(2\gamma + 120^\circ) & -L_{BC}^{(0)} + L_{BC}^{(m2)} \cos(2\gamma) \\ -L_{CA}^{(0)} + L_{CA}^{(m2)} \cos(2\gamma + 120^\circ) & -L_{CB}^{(0)} + L_{CB}^{(m2)} \cos(2\gamma) & L_{CC}^{(0)} + L_{CC}^{(m2)} \cos(2\gamma - 120^\circ) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Если рассматривать индуктивности, связывающие два перемещающихся друг относительно друга контура (фаза статора — обмотка ротора или обмотка ротора — фаза статора), то несложно заметить, что они изменяются по периодическому закону с периодом 2π . Другими словами, элементы матрицы $[L_{ar}]$ являются функцией косинуса угла γ , кроме синусоидальных зависимостей $L_{AQ}(\gamma)$, $L_{BQ}(\gamma)$ и $L_{CQ}(\gamma)$, т. к. обмотка Q лежит на оси, перпендикулярной оси расположения обмоток f, D . Амплитудное (максимальное) значение индуктивности — величина положительная, $L_{Af}^m > 0$.

Элементы матрицы индуктивностей $[L_{ra}] = [L_{ar}]^T$ также представляют собой периодические функции.

Рассмотрим элементы матрицы индуктивностей «статор—статор» $[L_{aa}]$. Это периодические функции угла γ , изменяющиеся в течение периода π . Если считать, что замкнут только контур A , то можно определить зависимость потокоцепления от тока фазы A с изменением времени (рис. 4.3). В зависимости от положения ротора на пути магнитного потока меняется магнитное сопротивление, т. к. при этом изменяется конфигурация магнитных масс. При углах поворота ротора, отличающихся на π , расположение магнитных масс в расточке статора одно и то же. Магнитное сопротивление минимально, когда ось d совпадает с осью A (угол поворота ротора γ равен

0 или π). Магнитный поток большей частью проходит по телу ротора, а индуктивность при этом максимальна. При $\gamma = \pi/2$ и $\gamma = 3\pi/2$, наоборот, магнитное сопротивление максимально, а индуктивное минимально.

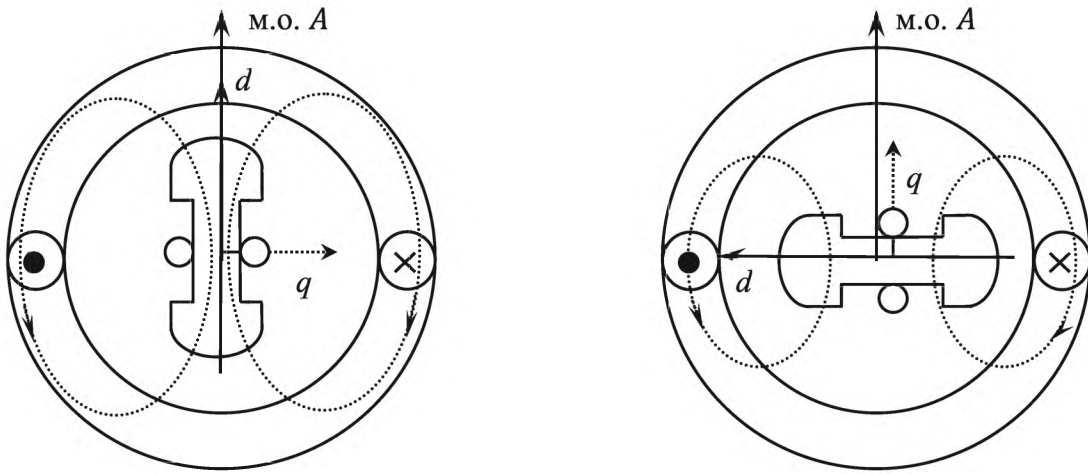


Рис. 4.3. Пример характера статорных индуктивностей

В большинстве практических расчетов для собственных индуктивностей статорных обмоток справедливо выражение

$$L_{AA}(\gamma) = L_{AA}^{(0)} + L_{AA}^{(m2)} \cos 2\gamma,$$

где $L_{AA}^{(0)} > 0$ — постоянная составляющая индуктивности; $L_{AA}^{(m2)}$ — амплитуда второй гармоники рассматриваемой индуктивности, при этом $L_{AA}^{(0)} > L_{AA}^{(m2)}$. Для остальных диагональных элементов матрицы $[L_{aa}]$ справедливо:

$$\begin{aligned} L_{BB}(\gamma) &= L_{BB}^{(0)} + L_{BB}^{(m2)} \cos 2(\gamma + 120^\circ) = \\ &= L_{BB}^{(0)} + L_{BB}^{(m2)} \cos(2\gamma + 120^\circ); \\ L_{CC}(\gamma) &= L_{CC}^{(0)} + L_{CC}^{(m2)} \cos 2(\gamma - 120^\circ) = \\ &= L_{CC}^{(0)} + L_{CC}^{(m2)} \cos(2\gamma - 120^\circ). \end{aligned}$$

Взаимная индуктивность между двумя фазами статора зависит от угла между осью d и линией, проведенной посередине между магнитными осями рассматриваемых фаз. Она всегда отрицательна, т. к. углы между магнитными осями фазных обмоток больше 90° , и при-

нимает наибольшие и наименьшие значения при соответствующих углах:

$$\begin{aligned}
 L_{AB}(\gamma) &= -L_{AB}^{(0)} + L_{AB}^{(m2)} \cos(2\gamma - 120^\circ) = \\
 &= -L_{AB}^{(0)} + L_{AB}^{(m2)} \cos 2(\gamma - 120^\circ); \\
 L_{AC}(\gamma) &= -L_{AC}^{(0)} + L_{AC}^{(m2)} \cos(2\gamma + 120^\circ) = \\
 &= -L_{AC}^{(0)} + L_{AC}^{(m2)} \cos 2(\gamma + 120^\circ); \\
 L_{BC}(\gamma) &= -L_{BC}^{(0)} + L_{BC}^{(m2)} \cos 2\gamma.
 \end{aligned}$$

Во вращающейся машине только некоторые индуктивности можно считать неизменными, все остальные характеристики зависят от положения ротора относительно обмоток статора и являются функциями времени. Элементы трех из четырех рассмотренных матриц явнополюсной СМ являются периодическими функциями угла γ , который характеризует положение ротора в расточке статора СМ. Если СМ неявнополюсная, то зависимость от угла γ частично устраняется, поскольку элементы $[L_{ar}]$ и $[L_{ra}]$ остаются периодическими функциями, а элементы $[L_{aa}]$ становятся константами (симметрия ротора приводит к постоянству магнитного сопротивления создаваемым потокам). Полученные уравнения (4.3) и (4.4) устанавливают взаимосвязь между напряжениями, токами, потокосцеплениями в произвольный момент времени и позволяют проанализировать переходный процесс в электрических цепях СМ. Поскольку потокосцепления зависят от времени, в т. ч. от индуктивностей, которые тоже функции времени, то дифференциальные уравнения (4.3) являются уравнениями с переменными коэффициентами и их решение затруднительно.

Для учета вращения угла положения ротора и электромагнитного момента дополнительно вводится уравнение движения

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = m_{\text{мех}} - m_{\text{э}},$$

где $m_{\text{мех}}$ — момент механических сил, приложенный со стороны вала машины; $m_{\text{э}}$ — электромагнитный момент.

В установившемся режиме скорость вращения ротора остается постоянной, при возмущениях ротор машины может ускоряться или тормозиться.

Дифференциальные уравнения напряжений синхронной машины (с переменными коэффициентами) для упрощения преобразуются в уравнения с постоянными коэффициентами, которые известны как уравнения Парка–Горева. В основе преобразований лежит переход к другой координатной системе (рис. 4.4).

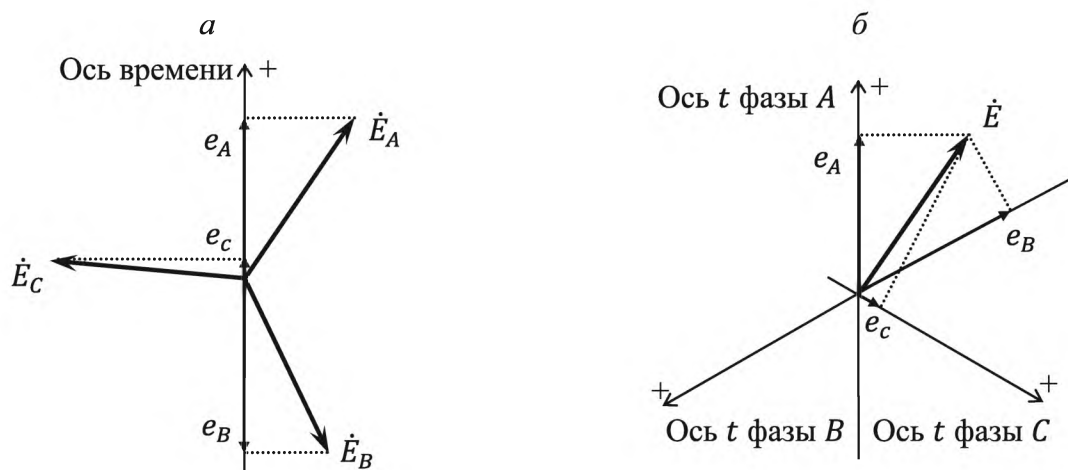


Рис. 4.4. Представление трехфазной системы:
а – общепринятое; б – с использованием обобщенного вектора

Обычно трехфазная система представляется симметричной звездой векторов, сдвинутых относительно друг друга на 120° , проекции которых на ось времени t дают мгновенные значения этих величин в фазах (рис. 4.4, а). Такие же мгновенные значения можно получить, проецируя единый (обобщенный) вектор на три оси времени, каждая из которых совпадает с магнитной осью соответствующей фазы (рис. 4.4, б). При его вращении в ту же сторону, что и системы трех векторов, чередование осей времени фаз нужно изменить на противоположное. При симметричном установившемся режиме конец обобщенного вектора описывает с постоянной скоростью окружность, а его значение равно амплитуде рассматриваемой величины.

Если имеется три вектора \vec{A} , \vec{B} , \vec{C} , сдвинутых относительно друг друга на $\rho = 120^\circ$, то проекции на них произвольного вектора \vec{f} (рис. 4.5) можно представить в виде проекций на три неподвижные координатные оси:

$$f_A = f \cos \theta ;$$

$$f_B = f \cos(\theta - \rho) = f \cos(\theta - 120^\circ) ;$$

$$f_C = f \cos(\theta + \rho) = f \cos(\theta + 120^\circ) ,$$

где \vec{f} — обобщенный вектор, характеризующий произвольные фазные переменные f_A, f_B, f_C . В общем случае длина \vec{f} определяется из соотношения

$$f_A^2 + f_B^2 + f_C^2 = \frac{3}{2} f^2 ;$$

$$f = \sqrt{\frac{2}{3} (f_A^2 + f_B^2 + f_C^2)} .$$

Таким вектором можно характеризовать любые фазные переменные величины (токи или напряжения) f_A, f_B, f_C , изменяющиеся в общем случае по произвольному закону при соблюдении условия $f_A + f_B + f_C = 0$.

В наиболее общем случае обобщающий вектор можно представить как $f_A + f_B + f_C = 3f_0$ (вектор не проходит через начало осей). При помощи следующих несложных преобразований получаем

$$\left. \begin{aligned} f'_A &= f_A - f_0 \\ f'_B &= f_B - f_0 \\ f'_C &= f_C - f_0 \end{aligned} \right\} (f'_A + f'_B + f'_C) = 0 .$$

Здесь вектор \vec{f}' представляет не исходные величины, а их функции.

Вектор \vec{f} можно рассматривать на координатной плоскости (рис. 4.6):

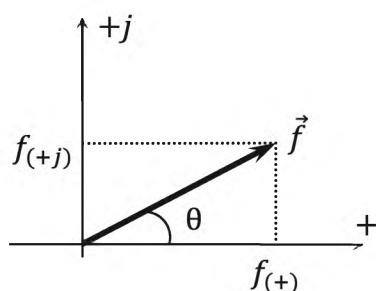


Рис. 4.6. Вектор на комплексной плоскости

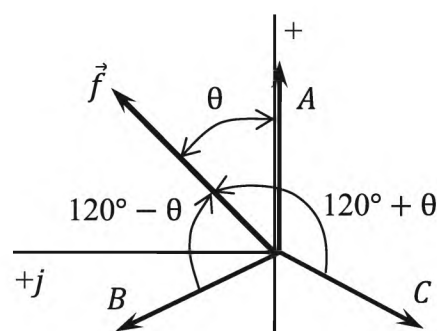


Рис. 4.5. Задание обобщенного вектора

$$\vec{f} = \{f_{(+)}, f_{(+j)}\} , \quad f_{(+)} = f \cos \theta , \\ f_{(+j)} = f \sin \theta , \text{ или } \vec{f} = f e^{j\theta} .$$

Возможность представления трехфазной системы векторов обобщенным вектором существенно упрощает выражение связи между статором и ротором.

4.2. Модель синхронной машины в осях $d, q, 0$

Для ввода новых координат используется преобразование, предложенное А. Е. Блонделем для установившегося режима явнополюсной СМ и впоследствии развитое Р. Х. Парком и А. А. Горевым для условий переходного процесса. Сущность преобразования состоит в следующем. Пусть двухосная система координат жестко связана с ротором. Чтобы ротор располагался симметрично относительно этих осей, они совмещаются с продольной и поперечной осями ротора, тогда введенная система координат станет неподвижной относительно ротора $\{d(\gamma), q(\gamma)\}$, при этом угол $\gamma(t) = \gamma_0 + \omega t$ остается функцией времени и будет отражать вращение ротора с угловой скоростью ω , которая в общем случае может изменяться. Если не соблюдается условие $f_A + f_B + f_C = 0$, то к координатам d и q должна быть добавлена третья координата «0», которая будет определять нулевую составляющую переменных величин. Далее переходим от переменных в координатах A, B, C к переменным в координатах $d, q, 0$. Линейное преобразование фазовых переменных, с помощью которого вводятся новые координаты, называется *преобразованием Блонделя*. Это преобразование направлено на перевод тройки векторов токов прямой последовательности фаз статора в векторы, неподвижные относительно ротора: $i_A, i_B, i_C \rightarrow i_d, i_q$.

Прямоугольная система координат (d, q) жестко связана с ротором СМ и ориентирована в пространстве таким образом, что оси координатной системы совпадают с ранее введенными осями ротора (рис. 4.7). Эта система координат вращается вместе с ротором с той же скоростью $\omega_r = \omega$.

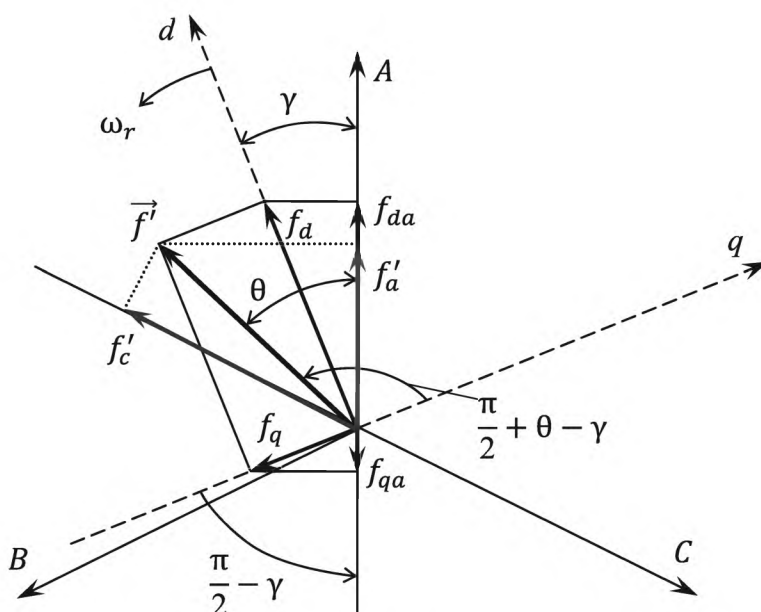


Рис. 4.7. Переход к координатам $d, q, 0$

Трехфазную систему представим обобщенным вектором \vec{f}' (это может быть любой параметр режима — ток или напряжение). Рассмотрим новые переменные — проекции \vec{f}' на оси d и q :

$$f_d = f' \cos(\theta - \gamma),$$

$$f_q = f' \sin(\theta - \gamma).$$

Их связь с фазными переменными представлена выражением

$$f_A' = f_{dA} + f_{qA} = f_d \cos \gamma + f_q \sin \gamma.$$

Поскольку для несимметричного режима фазовую переменную f_A' следует откорректировать $f_A = f_A' + f_0$, то получим новую систему уравнений

$$f_A = f_0 + f_d \cos \gamma + f_q \sin \gamma,$$

$$f_B = f_0 + f_d \cos(\gamma - 120^\circ) + f_q \sin(\gamma - 120^\circ),$$

$$f_C = f_0 + f_d \cos(\gamma + 120^\circ) + f_q \sin(\gamma + 120^\circ)$$

— это формулы прямого преобразования Blondеля — переход от фазовых переменных f_A, f_B, f_C к новым f_0, f_d, f_q . В матричной форме записи $\vec{f}_a \rightarrow \vec{f}_B$:

$$\vec{f}_a = [B] \cdot \vec{f}_B, \quad (4.5)$$

где $[B]$ — квадратная матрица преобразования Blondеля,

$$[B] = \begin{bmatrix} 1 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 1 & \cos(\gamma - 120^\circ) & \sin(\gamma - 120^\circ) \\ 1 & \cos(\gamma + 120^\circ) & \sin(\gamma + 120^\circ) \end{bmatrix}.$$

В установившемся режиме скорость вращения ротора (оси d) и вектора \vec{i}_a одинакова, значит, угол $(\theta - \gamma) = \text{const}$, токи статора в системе координат, вращающейся вместе с ротором, являются величинами постоянными. Если бы наблюдатель, находящийся на роторе и вращающийся вместе с ним, следил за процессом изменения режимных параметров в статоре, то он видел бы их значения неизменными. И наоборот, если бы в фазе статора протекал постоянный ток, то наблюдатель на роторе видел бы гармоническое изменение величин тока. Новым токам i_d, i_q можно дать и физическое обоснование (нельзя рассматривать только как математическое преобразо-

вание). Так i_d можно представить как мгновенное значение тока в фиктивной обмотке статора, вращающейся со скоростью ротора, ось которой в любой момент времени совпадает с продольной осью ротора. Значение тока в обмотке таково, что он создает такую же намагничивающую силу по продольной оси, как три действительных фазных тока, протекающих в обмотках статора. Физическое истолкование тока i_q аналогично представленному выше, надо лишь помнить, что он действует в поперечной оси.

Поскольку фазные обмотки, расположенные в осях d и q , неподвижны относительно ротора, все индуктивности такой машины постоянны. Матричная запись обратного преобразования Blondela $\vec{f}_B = [B]^{-1} \vec{f}_a$ определяет блонделевы переменные через фазовые. В координатной форме это

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{1}{3}(f_A + f_B + f_C), \\ f_d &= \frac{2}{3}(f_A \cos \gamma + f_B \cos(\gamma - 120^\circ) + f_C \cos(\gamma + 120^\circ)), \\ f_q &= \frac{2}{3}(f_A \sin \gamma + f_B \sin(\gamma - 120^\circ) + f_C \sin(\gamma + 120^\circ)). \end{aligned}$$

Матрица $[B^{-1}]$ обратного преобразования Blondela определяется как

$$[B^{-1}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} \cos \gamma & \frac{2}{3} \cos(\gamma - 120^\circ) & \frac{2}{3} \cos(\gamma + 120^\circ) \\ \frac{2}{3} \sin \gamma & \frac{2}{3} \sin(\gamma - 120^\circ) & \frac{2}{3} \sin(\gamma + 120^\circ) \end{bmatrix}.$$

Три тока нулевой последовательности представляются током $f_0 = i_0$. Для симметричных режимов, а при соединении трехфазных обмоток в звезду с изолированной нейтралью и для несимметричных режимов, $i_0 = 0$. Векторно-матричные уравнения для потокосцеплений (4.4) после блонделевых преобразований примут вид

$$\vec{\Psi}_B = [L_{aa}^B] \vec{i}_B + [L_{ar}^B] \vec{i}_r,$$

$$\vec{\Psi}_r = [L_{ra}^B] \vec{i}_B + [L_{rr}^B] \vec{i}_r,$$

где $[L_{aa}^B] = [B^{-1}][L_{aa}][B]$, $[L_{ar}^B] = [B^{-1}][L_{ar}]$, $[L_{ra}^B] = [L_{ra}][B]$; \vec{i}_B — вектор-столбец статорных токов, $\vec{i}_B^T = [i_0 \ i_d \ i_q]$.

Вектор роторных токов (матрица индуктивностей «ротор–ротор») преобразованию не подвергается. Элементы матрицы «статор–ротор» после преобразования

$$[L_{ar}^B] = \begin{bmatrix} L_{0f} & L_{0D} & L_{0Q} \\ L_{df} & L_{dD} & L_{dQ} \\ L_{qf} & L_{qD} & L_{qQ} \end{bmatrix}$$

таковы, что $L_{0f} = L_{0D} = L_{0Q} = 0$, $L_{qf} = L_{qD} = 0$, $L_{dQ} = 0$, $L_{df} = L_{Af}^m$, $L_{dD} = L_{AD}^m$, $L_{qQ} = L_{AQ}^m$. Элементы матрицы «ротор–статор»

$$[L_{ra}^B] = \begin{bmatrix} L_{f0} & L_{fd} & L_{fq} \\ L_{D0} & L_{Dd} & L_{Dq} \\ L_{Q0} & L_{Qd} & L_{Qq} \end{bmatrix},$$

до преобразования получающиеся простым транспонированием предшествующей матрицы, теперь изменяют свои значения:

$$L_{f0} = L_{D0} = L_{Q0} = 0; \quad L_{fq} = L_{Dq} = 0; \quad L_{Qd} = 0;$$

$$L_{fd} = \frac{3}{2} L_{Af}^m = \frac{3}{2} L_{df}; \quad L_{Dd} = \frac{3}{2} L_{AD}^m = \frac{3}{2} L_{dD}; \quad L_{Qq} = \frac{3}{2} L_{AQ}^m = \frac{3}{2} L_{qQ}.$$

После преобразования Blondely матрицы «статор–ротор» и «ротор–статор» потеряли симметрию, а прежде были симметричны. В математической модели, в отличие от исходной физической модели, коэффициенты индукции уже не удовлетворяют принципу взаимности.

Для анализа элементов матрицы

$$[L_{aa}^B] = \begin{bmatrix} L_{00} & L_{0d} & L_{0q} \\ L_{d0} & L_{dd} & L_{dq} \\ L_{q0} & L_{qd} & L_{qq} \end{bmatrix}$$

после преобразования вместо фазных статорных обмоток рассматриваются три «новые» обмотки — 0, d , q . Обмотка 0 не имеет индуктивных связей ни с одним из контуров, расположенных на роторе. Обмотки d и q вращаются вместе с ротором машины, d расположена

в продольной оси, а q — в поперечной, следовательно, с первой индуктивно связаны роторные обмотки f и D , а со второй — только обмотка Q . Коэффициенты L_{0d} , L_{0q} , L_{d0} , L_{q0} будут равны нулю, т. е. обмотка 0 не имеет индуктивных связей с другими обмотками статора. Поскольку обмотки расположены под углом 90° , постольку $L_{dq} = L_{qd} = 0$. Таким образом, в этой матрице от нуля отличны только элементы главной диагонали. В рассматриваемой модели они постоянны, т. е. L_{00} , L_{dd} , $L_{qq} \rightarrow \text{const}$. Если значение нулевого тока статора и отличается от нуля, то он все равно не оказывает влияния на движение ротора синхронной машины (результатирующий поток от токов рассеяния в центре расточки статора равен 0) и не участвует в создании вращающегося поля.

Характерной особенностью полученных матриц и уравнений является отсутствие индуктивностей, зависящих от углового положения ротора, т. е. от угла γ . После соответствующих подстановок уравнения, описывающие режимные параметры синхронной машины, будут следующими.

Вместо выражения (4.1) получим

$$\begin{aligned} u_d &= -\psi_q \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\psi_d}{dt} - Ri_d; \\ u_q &= \psi_d \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\psi_q}{dt} - Ri_q; \\ u_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + R_f i_f; \\ 0 &= \frac{d\psi_D}{dt} + R_D i_D; \\ 0 &= \frac{d\psi_Q}{dt} + R_Q i_Q, \end{aligned} \tag{4.6}$$

где (Ri_d, Ri_q) — падение напряжения в продольной и поперечной обмотке статора на их активном сопротивлении.

В переходном процессе потокосцепления ψ_d и ψ_q меняются по абсолютной величине (пульсируют), изменения потокосцеплений приводят к появлению в обмотках d и q трансформаторных ЭДС $d\psi_d/dt, d\psi_q/dt$. В контурах вращающихся машин потокосцепления создают ЭДС вращения, обусловленные перемещением векторов $\vec{\psi}$ в пространстве относительно этих контуров, их величина пропорциональна скорости перемещения, умноженной на составляющую потокосцепления, которая направлена вдоль плоскости данной обмотки. Следует отметить, что трансформаторные ЭДС равны нулю в любом установившемся режиме, ЭДС вращения обращаются в нуль только при отсутствии перемещения ротора или при равенстве нулю соответствующих потокосцеплений. Последние три уравнения связаны с роторными токами и потокосцеплениями, следовательно, не изменяются.

После преобразования выражений (4.2) получим

$$\begin{aligned}\psi_0 &= L_{00}i_0; \\ \psi_d &= L_{dd}i_d + L_{df}i_f + L_{dD}i_D; \\ \psi_q &= L_{qq}i_q + L_{qQ}i_Q; \\ \psi_f &= L_{fd}i_d + L_{ff}i_f + L_{fD}i_D; \\ \psi_D &= L_{Dd}i_d + L_{Df}i_f + L_{DD}i_D; \\ \psi_Q &= L_{Qq}i_q + L_{QQ}i_Q.\end{aligned}\tag{4.7}$$

Вращение ротора определяет наличие электромагнитного момента, который обычно рассчитывается как произведение тока в обмотке статора, потокосцепления и синуса угла между ними. Следовательно, действующие на ротор электромагнитные силы от взаимодействия одноименных токов и потокосцеплений обмотки статора (i_d и ψ_d, i_q и ψ_q) равны нулю. Результирующий электромагнитный момент возникает от взаимодействия разноименных токов и потокосцеплений, причем момент, обусловленный взаимодействием i_q и ψ_d , действует на ротор в направлении его вращения, момент, определяемый i_d и ψ_q , направлен против вращения ротора, а результирующий электромагнитный момент равен

$$M_{\Sigma} = i_q \Psi_d - i_d \Psi_q. \quad (4.8)$$

Уравнения потокосцеплений (4.7) получились в соответствии с коэффициентами индукции. Симметрия коэффициентов в уравнениях потокосцеплений отсутствует:

$$L_{fd} = \frac{3}{2} L_{df}; \quad L_{Dd} = \frac{3}{2} L_{dD}; \quad L_{Qq} = \frac{3}{2} L_{qQ}.$$

Если записать уравнения в некоторой специальной системе относительных единиц (сп. о. е.), т. е. вместо действительных токов ротора рассмотреть уменьшенные в $2/3$ раза, а вместо действительных индуктивностей цепей ротора — увеличенные в $3/2$ раза, тогда множитель $3/2$ пропадет и принцип взаимности в отношении индуктивностей магнитосвязанных цепей статора и ротора будет соблюдаться.

Для упрощения выражений (4.6) и (4.7) можно коэффициенты взаимоиндукции между контурами в продольной оси ротора принять строго равными друг другу, поскольку они имеют близкие значения:

$$L_{fd*} = L_{df*} = L_{fD*} = L_{Df*} = L_{dD*} = L_{Dd*} = L_{ad*},$$

где L_{ad*} — индуктивность реакции статора синхронной машины по продольной оси (взаимная индуктивность обмоток статора и ротора в продольной оси); индекс «*» соответствует специальной системе относительных единиц и далее будет опускаться.

Такое допущение связано с тем, что основное сопротивление (индуктивность) — это сопротивление воздушного зазора, и если принять проницаемость стали бесконечно большой, то равенство будет строгим. Продольная индуктивность СМ, или индуктивность фазной обмотки статора в направлении оси d $L_{dd} = L_d$, — это индуктивность прямой последовательности при вращении ротора с синхронной частотой и при ориентации поля токов статора по продольной оси. Эта индуктивность учитывает взаимные составляющие с другими фазами.

Дополнительно вводятся следующие индуктивности:

$L_{qQ} = L_{Qq} = L_{aq}$ — индуктивность поперечной реакции статора СМ;

$L_{00} = L_0$ — нулевой последовательности;

$L_{ff} = L_f$ — возбуждения;

$L_{DD} = L_D$ — продольно-демпферная индуктивность;

$L_{qq} = L_q$ — поперечная;

$L_{QQ} = L_Q$ — поперечно-демпферная индуктивность СМ.

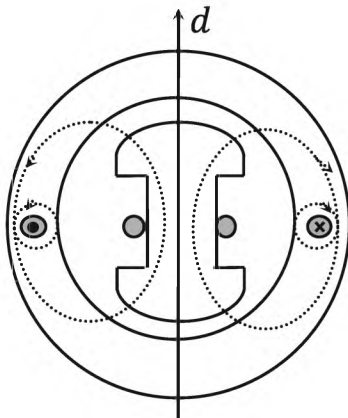


Рис. 4.8. Пути магнитных потоков

Рассмотрим обмотки в продольной оси ротора и допустим такой режим, в котором в статоре СМ протекает ток i_d , а токи $i_f = i_D = 0$. Это соответствует подключению к трехфазной сети с симметричными напряжениями синхронной машины с отключенной системой возбуждения. Если ротор машины вращать с частотой, равной частоте магнитного поля, то ротор и магнитное поле статора будут неподвижны относительно друг друга (рис. 4.8). При этом потокосцепления для контуров по оси d определяются выражениями (4.7), потокосцепление по оси q равно нулю:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d; \\ \psi_f = L_{ad} i_d; \\ \psi_D = L_{ad} i_d. \end{cases}$$

Результирующее магнитное поле складывается из магнитного поля рассеяния обмотки статора и поля, проходящего через зазор машины по оси d (поля реакции якоря), потокосцепление рассеяния статора по продольной оси будет

$$\psi_d - \psi_f = \psi_d - \psi_D = \psi_{a\sigma d} = L_{a\sigma d} i_d = (L_d - L_{ad}) i_d,$$

где $L_{a\sigma d}$ — индуктивность рассеяния статора по продольной оси, $L_{a\sigma d} = L_d - L_{ad}$.

Аналогично ей определяется индуктивность рассеяния статора и по поперечной оси: если $\psi_q - \psi_Q = \psi_{a\sigma q} = L_{a\sigma q} i_q = (L_q - L_{aq}) i_q$, то $L_{a\sigma q} = L_q - L_{aq}$. Практически для всех машин индуктивность рассеяния по продольной и поперечной оси равны, $L_{a\sigma q} = L_{a\sigma d} = L_{a\sigma}$. Полная индуктивность (продольная и поперечная) может быть определена как сумма индуктивностей реакции статора и рассеяния

$$\begin{cases} L_d = L_{ad} + L_{a\sigma}; \\ L_q = L_{aq} + L_{a\sigma}, \end{cases}$$

где L_{ad} , L_{aq} — индуктивности взаимоиндукции между обмотками; $L_{a\sigma}$ — индуктивность рассеяния статорной обмотки.

Индуктивности рассеяния всех остальных обмоток также определяются как разность между собственной индуктивностью и взаимоиндукции между обмотками:

$L_{f\sigma}$ — индуктивность рассеяния обмотки f , $L_{f\sigma} = L_f - L_{ad}$;

$L_{D\sigma}$ — то же, D , $L_{D\sigma} = L_D - L_{ad}$;

$L_{Q\sigma}$ — то же, Q , $L_{Q\sigma} = L_Q - L_{aq}$.

Полная упрощенная система уравнений Парка–Горева в системе специальных относительных единиц выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
 u_0 &= -\frac{d\psi_0}{dt} - Ri_0; \\
 u_d &= -\psi_q \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\psi_d}{dt} - Ri_d; \\
 u_q &= \psi_d \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\psi_q}{dt} - Ri_q; \\
 u_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + R_f i_f; \\
 0 &= \frac{d\psi_D}{dt} + R_D i_D; \\
 0 &= \frac{d\psi_Q}{dt} + R_Q i_Q; \\
 \psi_0 &= L_{00} i_0 = L_0 i_0; \\
 \psi_d &= L_d i_d + L_{ad} i_f + L_{ad} i_D = L_{a\sigma} i_d + L_{ad} (i_d + i_f + i_D); \\
 \psi_q &= L_q i_q + L_{aq} i_Q = L_{a\sigma} i_q + L_{aq} (i_q + i_Q); \\
 \psi_f &= L_{ad} i_d + L_f i_f + L_{ad} i_D = L_{f\sigma} i_f + L_{ad} (i_f + i_d + i_D); \\
 \psi_D &= L_{ad} i_d + L_{ad} i_f + L_D i_D = L_{D\sigma} i_D + L_{ad} (i_f + i_d + i_D); \\
 \psi_Q &= L_{aq} i_q + L_Q i_Q = L_{Q\sigma} i_Q + L_{aq} (i_q + i_Q).
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Основные особенности полученной системы:

- все коэффициенты, стоящие в правых частях уравнений для потокосцеплений, являются постоянными величинами;
- в любом установившемся режиме (при $d\gamma/dt = \omega = \text{const}$) система уравнений становится линейной;
- изменение во времени нулевых составляющих потокосцеплений, напряжений и токов происходит вне зависимости от изменения соответствующих продольных (ψ_d, u_d, i_d) и поперечных (ψ_q, u_q, i_q) составляющих;
- уравнения для напряжений по продольной и поперечной осям статора аналогичны подобным уравнениям в фазовых координатах (4.1), (4.2), только вместо фазовых напряжений в них фигурируют ЭДС в обмотках d и q , каждая из которых состоит из трансформаторной ЭДС ($-d\psi_d/dt, -d\psi_q/dt$) и ЭДС вращения ($\psi_d d\gamma/dt, -\psi_q d\gamma/dt$).

Трансформаторные ЭДС равны нулю в любом установившемся режиме, а ЭДС вращения могут обращаться в нуль только при отсутствии перемещения ротора ($d\gamma/dt = 0$) или равенстве нулю соответствующих потокосцеплений.

Полученные уравнения имеют схемную интерпретацию, т. е. синхронную машину теперь можно представить следующими схемами замещения. Схема рис. 4.9 описывается дифференциальным уравнением вида $u = Ri + L di/dt = Ri + d\psi/dt$. В соответствии с первыми шестью уравнениями системы Парка–Горева (4.9) составляются новые схемы замещения.

Схема замещения для нулевой последовательности (рис. 4.10) соответствует уравнению $u_0 = -d\psi_0/dt - Ri_0$. На рис. 4.11 приведена схема замещения по оси d , на рис. 4.12 — по оси q .

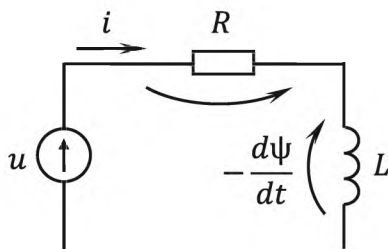


Рис. 4.9. Схема RL -цепи

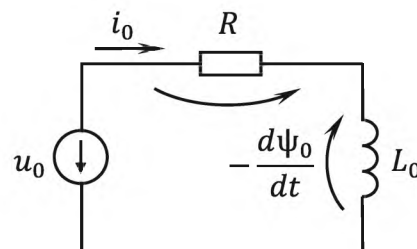


Рис. 4.10. Схема нулевой последовательности

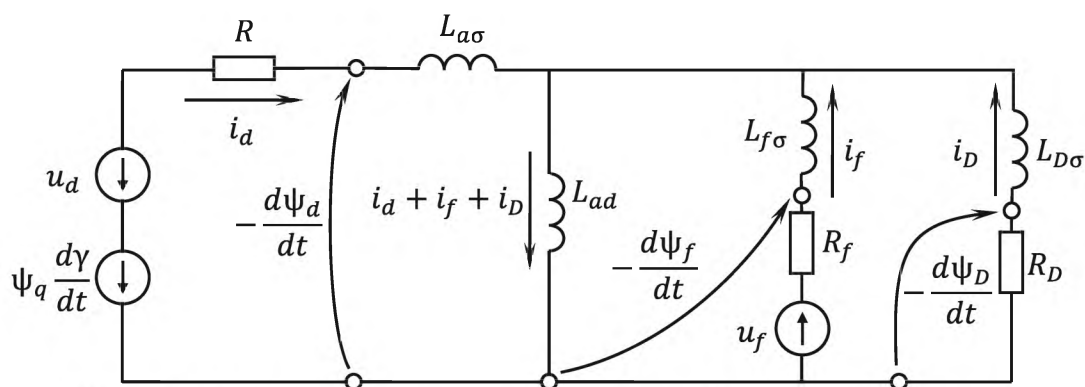


Рис. 4.11. Схема замещения синхронной машины по оси d

Схемы по осям d и q взаимозависимы, связь обусловлена ЭДС вращения, которая усложняет схемную реализацию. Величина $d\gamma/dt$ определяется на основании интегрирования уравнения движения СМ при изменении скорости вращения ротора. Значение ψ_d для схемы q берется из схемы d , и наоборот. Если пренебречь ЭДС вращения, то эта связь пропадает.

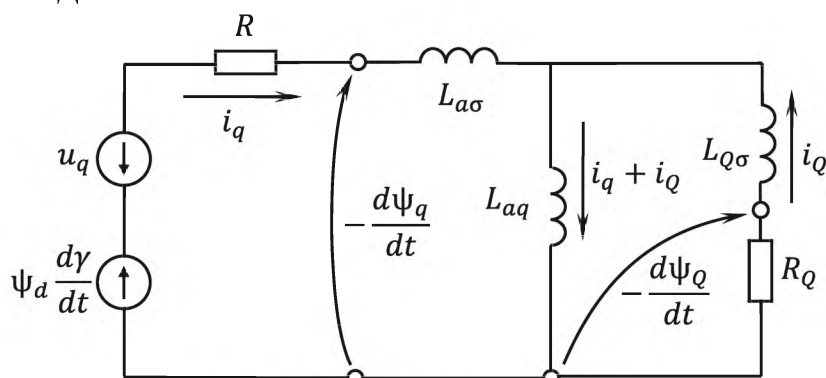


Рис. 4.12. Схема замещения синхронной машины по оси q

Полученная модель СМ позволяет определить ее параметры как в установившемся, так и в переходном режиме.

Своей постоянной времени в синхронной машине характеризуются не только индуктивности, но и каждый из контуров. Например, для обмотки возбуждения значение постоянной времени равно

$$T_f = L_f / R_f.$$

Величина коэффициента рассеяния характеризует магнитную связь между любыми обмотками i и j , расположенными по одной оси ($i, j = d, q, f, D, Q$):

$$\sigma_{ij} = 1 - \frac{L_{ij}^2}{L_i L_j}.$$

Суммируя все вышесказанное, основные этапы анализа параметров электрических режимов для синхронных машин можно свести к последовательности, показанной на рис. 4.13.

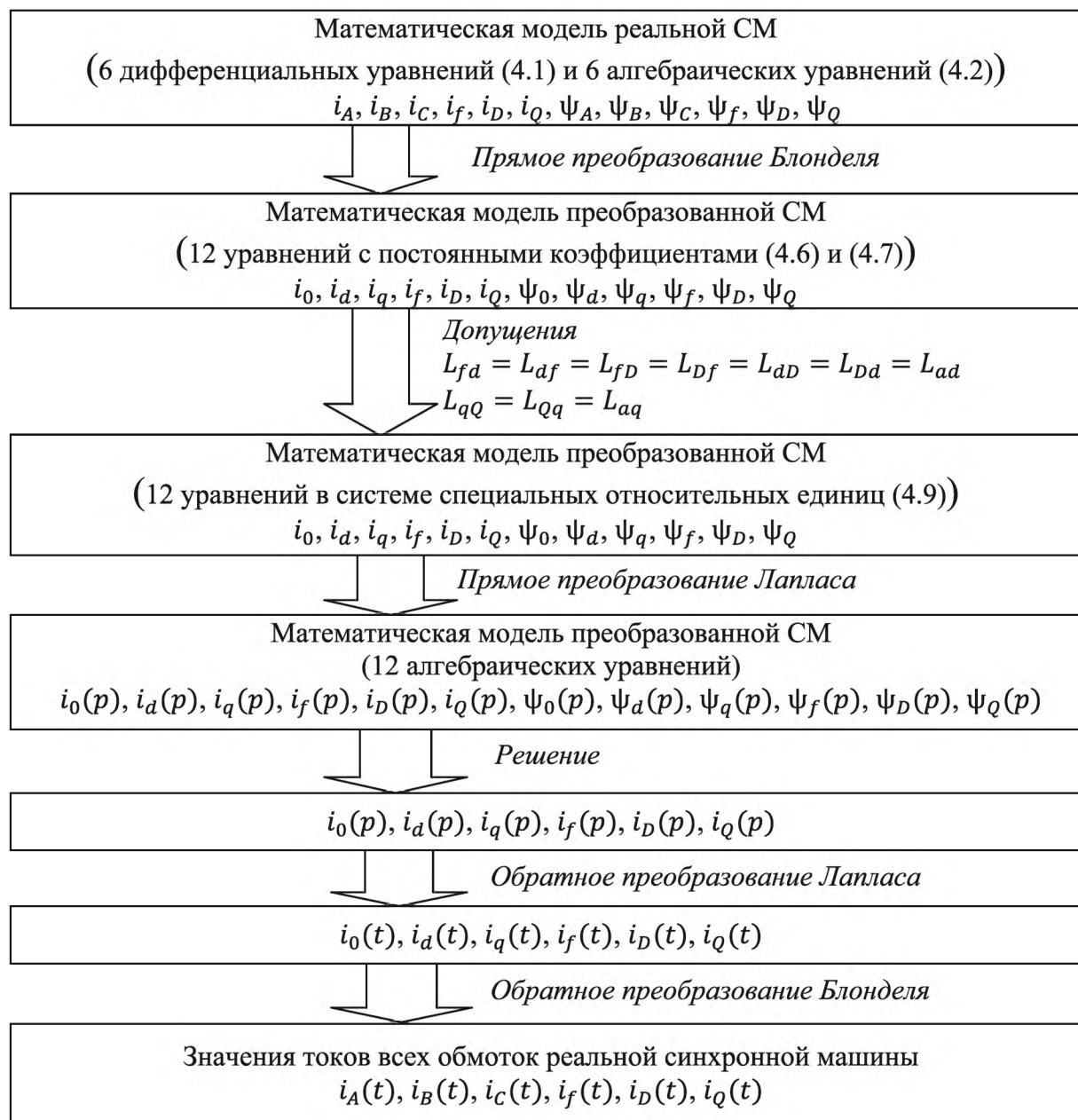


Рис. 4.13. Основные этапы анализа режимов синхронных машин

4.3. Параметры синхронной машины

Как можно видеть из схем замещения по оси d (рис. 4.11, 4.12), параметры СМ определяются схемными индуктивностями $L_{a\sigma}, L_{ad}, L_{f\sigma}, L_{D\sigma}$ и активными сопротивлениями R, R_f, R_D , а по оси q — соответственно $L_{a\sigma}, L_{aq}, L_{Q\sigma}$ и R, R_Q . Индуктивности всех контуров

модели СМ (L_d, L_f, L_D, L_q, L_Q) определяются через эти схемные индуктивности. Если схемы замещения СМ рассматривать без активных сопротивлений и источников, то получим схемы, сходные со схемами замещения трехобмоточного трансформатора в продольной оси и двухобмоточного — в поперечной.

Собственные индуктивности по продольной оси (рис. 4.14, *a*) определяются по формулам

$$\begin{aligned} L_d &= L_{a\sigma} + L_{ad}; \\ L_f &= L_{f\sigma} + L_{ad}; \\ L_D &= L_{D\sigma} + L_{ad}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

по поперечной оси (рис. 4.14, *б*)

$$\begin{aligned} L_q &= L_{a\sigma} + L_{aq}; \\ L_Q &= L_{Q\sigma} + L_{aq}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

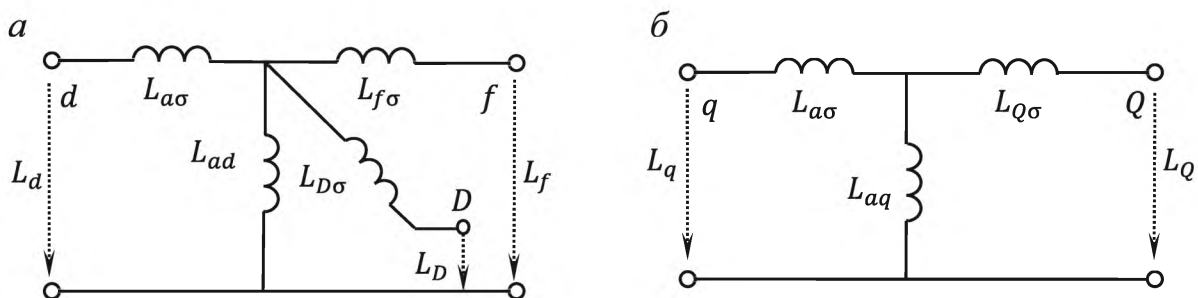


Рис. 4.14. Индуктивности синхронной машины по оси d (*a*) и оси q (*б*)

Каждая из этих контурных индуктивностей находится как эквивалентное значение относительно рассматриваемых зажимов при условии, что все остальные зажимы разомкнуты.

При анализе переходных режимов необходимо знать величину индуктивности, а также постоянных времени, которые, в свою очередь, определяются при замыкании одного или нескольких контуров.

Если накоротко замкнуть все контуры, расположенные на роторе синхронной машины (рис. 4.15, *a, б*), то можно определить так называемые сверхпереходные индуктивности по продольной и поперечной оси

$$L_d'' = L_{a\sigma} + \left(\frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{L_{f\sigma}} + \frac{1}{L_{D\sigma}} \right)^{-1};$$

$$L_q'' = L_{a\sigma} + \left(\frac{1}{L_{aq}} + \frac{1}{L_{Q\sigma}} \right)^{-1}.$$

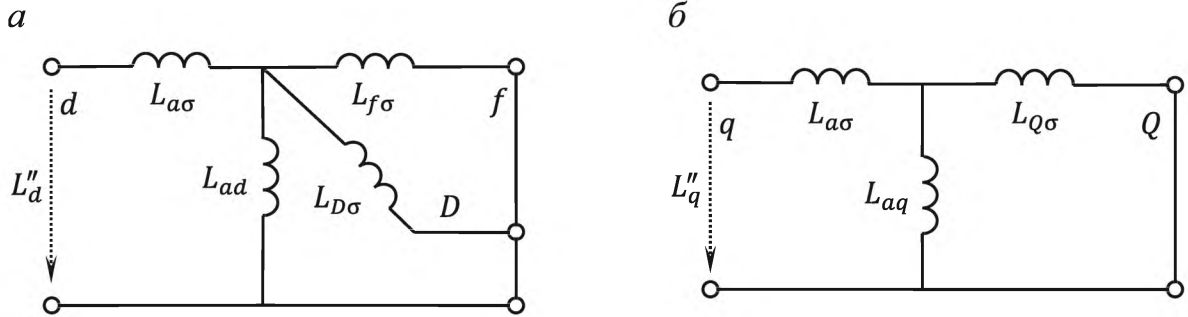


Рис. 4.15. Сверхпереходные индуктивности синхронной машины по оси d (a) и оси q (b)

Если предположить, что накоротко замкнуты статорные обмотки (рис. 4.16, a , b), то можно определить роторные переходные индуктивности:

$$L_f' = L_{f\sigma} + \left(\frac{1}{L_{a\sigma}} + \frac{1}{L_{ad}} \right)^{-1} = L_{f\sigma} + L_{ad}';$$

$$L_D' = L_{D\sigma} + \left(\frac{1}{L_{a\sigma}} + \frac{1}{L_{ad}} \right)^{-1} = L_{D\sigma} + L_{ad}';$$

$$L_Q' = L_{Q\sigma} + \left(\frac{1}{L_{a\sigma}} + \frac{1}{L_{aq}} \right)^{-1} = L_{Q\sigma} + L_{aq}',$$

где L_{ad}' и L_{aq}' представляют собой продольную и поперечную индуктивности реакции статора при замкнутом статоре и определяются как

$$L_{ad}' = \frac{L_{ad}L_{a\sigma}}{L_{ad} + L_{a\sigma}} = \frac{L_{ad}L_{a\sigma}}{L_d};$$

$$L_{aq}' = \frac{L_{aq}L_{a\sigma}}{L_{aq} + L_{a\sigma}} = \frac{L_{aq}L_{a\sigma}}{L_q}.$$

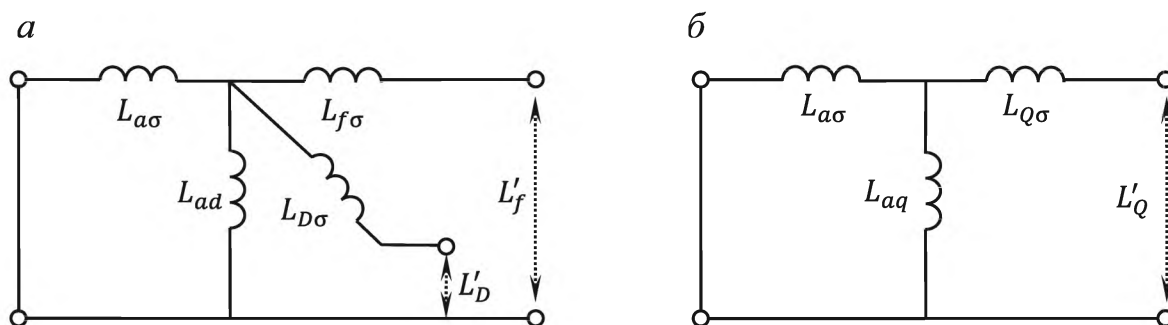


Рис. 4.16. Роторные индуктивности синхронной машины по оси d (а) и оси q (б)

Постоянные времени роторных контуров при замкнутом статоре

$$\begin{aligned} T'_f &= \frac{L'_f}{R_f}; \\ T'_D &= \frac{L'_D}{R_D}; \\ T'_Q &= \frac{L'_Q}{R_Q}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Для характеристики свойств схемы замещения СМ по продольной оси вводятся эквивалентные постоянные времени, определяемые при разомкнутом и замкнутом статоре, причем они не могут быть соотнесены с какой-либо отдельной обмоткой синхронной машины. К таким постоянным времени относятся:

- переходная постоянная времени СМ, определенная при разомкнутом статоре (для ненагруженной машины),

$$T'_{d0} = \frac{1}{a - \sqrt{a^2 - b}},$$

- сверхпереходная постоянная времени СМ для ненагруженной машины

$$T''_{d0} = \frac{1}{a + \sqrt{a^2 - b}},$$

где

$$a = \frac{T_f + T_D}{2\sigma_{fD}T_fT_D}, \quad b = \frac{1}{\sigma_{fD}T_fT_D}.$$

При замкнутом статоре определяются:

– переходная постоянная времени

$$T'_d = \frac{1}{a' - \sqrt{(a')^2 + b'}} \cong \frac{x'_d}{x_d} T'_{d0}; \quad (4.13)$$

– сверхпереходная постоянная времени при короткозамкнутом якоре

$$T''_d = \frac{1}{a' + \sqrt{(a')^2 + b'}} \cong \frac{x''_d T'_{d0} T''_{d0}}{x_d T'_d}, \quad (4.14)$$

где

$$a' = \frac{T'_f + T'_D}{2\sigma'_{fD} T'_f T'_D}, \quad b' = \frac{1}{\sigma'_{fD} T'_f T'_D}.$$

Здесь

$$\sigma'_{fD} = 1 - \frac{(L'_{ad})^2}{L'_f L'_D}.$$

4.4. Установившийся режим работы синхронной машины

В установившемся режиме ротор вращается с постоянной круговой синхронной скоростью $d\gamma/dt = \omega_{\text{синх}}$. В статоре при этом протекает три симметричных фазных тока прямой последовательности, а напряжения на зажимах статора синхронной машины образуют симметричную тройку напряжений прямой последовательности. Тогда $i_0 = 0$, токи i_d, i_q постоянны, $u_0 = 0, u_d, u_q \rightarrow \text{const}$. Если использовать систему специальных относительных единиц, где синхронная круговая частота является базисной величиной, то $d\gamma/dt = \omega_c == \omega_r = 1$ сп. о. е. Для установившегося режима справедливо $d\psi_k/dt = 0$ ($k = d, q, f, D, Q$), $i_D = i_Q = 0$. Учитывая все обстоятельства, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}
u_d &= -\psi_q \omega_c - R i_d; \\
u_q &= \psi_d \omega_c - R i_q; \\
u_f &= R_f i_f; \\
\psi_d &= L_{a\sigma} i_d + L_{ad}(i_d + i_f) = L_d i_d + L_{ad} i_f; \\
\psi_q &= L_{a\sigma} i_q + L_{aq} i_q = L_q i_q; \\
\psi_f &= L_{f\sigma} i_f + L_{ad}(i_f + i_d) = L_f i_f + L_{ad} i_d; \\
\psi_D &= L_{ad}(i_f + i_d); \\
\psi_Q &= L_{aq} i_q.
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Напряжение обмотки возбуждения $u_f \rightarrow \text{const}$.

$$u_d = -\psi_q \omega_c - R i_d = -L_q i_q \omega_c - R i_d = -x_q i_q - R i_d,$$

где $L_q \omega_c$ — синхронная поперечная реактивность (реактивное сопротивление) СМ, численно равная в системе сп. о. е. индуктивности L_q , $L_q \omega_c = x_q$;

$$\begin{aligned}
u_q &= \psi_d \omega_c - R i_q = (L_d i_d + L_{ad} i_f) \omega_c - R i_q = \\
&= L_d i_d \omega_c + L_{ad} i_f \omega_c - R i_q = x_d i_d + x_{ad} i_f - R i_q,
\end{aligned}$$

где $L_d \omega_c$ — синхронное продольное реактивное сопротивление СМ, $L_d \omega_c = x_d$; $L_{ad} \omega_c$ — синхронное реактивное сопротивление продольной реакции статора, $L_{ad} \omega_c = x_{ad}$. Обозначим

$$x_{ad} i_f = e_q \tag{4.16}$$

как синхронную ЭДС машины, т. е. ЭДС, наводимую током возбуждения i_f в обмотке q статора. Теперь уравнения, характеризующие установившийся режим работы СМ, будут выглядеть как

$$u_d + x_q i_q + R i_d = 0 \text{ для напряжения статора по продольной оси;}$$

$$u_q - x_d i_d + R i_q = e_q \text{ для напряжения статора по поперечной оси;}$$

$$u_f = R_f i_f \text{ для напряжения обмотки возбуждения;}$$

$$e_q = x_{ad} i_f \text{ для синхронной ЭДС по оси } q.$$

Представим эти уравнения с помощью векторной диаграммы в осях d и q , совпадающих с осями ротора СМ. Предположим, что машина — генератор, выдающий в сеть активную и реактивную мощность, т. о., рассматривается активно-индуктивный режим. При отсутствии насыщения каждый из возникающих магнитных потоков можно рассматривать независимо друг от друга. К обмотке ротора приложено постоянное напряжение u_f , через обмотку протекает ток i_f , создающий магнитный поток $\dot{\Phi}_f$, который состоит из полезного потока (замыкающегося через «железо») $\dot{\Phi}_{fad}(\dot{\Phi}_d)$ и потока рассеяния $\dot{\Phi}_{f\sigma}$ ротора, замыкающегося через воздушный зазор ($\sigma_{f\sigma}$ — коэффициент рассеяния ротора),

$$\dot{\Phi}_{f\sigma} = \sigma_{f\sigma} \dot{\Phi}_f.$$

При вращении магнитного потока $\dot{\Phi}_{fad}$ в обмотке q статора наводится ЭДС e_q , а в обмотке d ЭДС не наводится, т. к. поток, созданный током i_f и сцепленный со статором, направлен по оси d , а ЭДС отстает от соответствующего потокосцепления на угол $\pi/2$. Полезный поток определяется геометрической разностью продольного потока в воздушном зазоре $\dot{\Phi}_{\delta d}$ и потока продольной реакции статора $\dot{\Phi}_{ad}$ (рис. 4.17)

$$i_f \rightarrow \dot{\Phi}_f = \dot{\Phi}_d + \dot{\Phi}_{f\sigma};$$

$$\dot{\Phi}_{\Sigma} = \dot{\Phi}_f - \dot{\Phi}_{ad} = \dot{\Phi}_{fad} - \dot{\Phi}_{ad} + \dot{\Phi}_{f\sigma}.$$

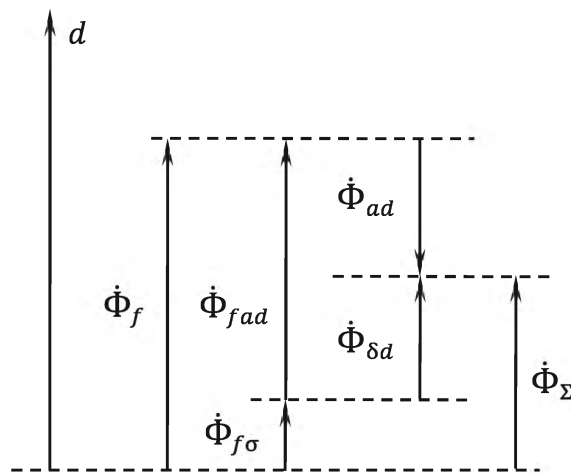


Рис. 4.17. Магнитные потоки СМ в установившемся режиме по оси d

При нагрузке генератора по статорным обмоткам протекает ток, который раскладывается на две составляющие — продольную i_d и поперечную i_q . Ток i_d создает поток продольной реакции статора $i_d \rightarrow \Phi_{ad}$, потокосцепление которого пропорционально ЭДС, направленной по оси q , $\psi_{ad}\omega_c = e_{aq}$. Векторы располагаются в осях d, q , направления ЭДС определяются направлениями магнитных потоков (вектор ЭДС отстает от вектора Φ на 90°). Точно так же ток $i_q \rightarrow \Phi_{aq}$ и потокосцепление поперечной реакции статора определяют ЭДС, направленную по оси d , $\psi_{aq}\omega_c = e_{ad}$. Иначе говоря, составляющие ЭДС реакции статора можно рассчитать через индуктивные сопротивления:

$$e_{aq} = x_{ad}i_d;$$

$$e_{ad} = x_{aq}i_q.$$

Ток i создает поток рассеяния статора Φ_σ .

$$e_\sigma = ix_\sigma;$$

$$x_\sigma = x_{\sigma d} = x_{\sigma q}.$$

Напряжение на зажимах генератора можно найти из диаграммы в осях d, q (рис. 4.18) и по соотношению

$$\vec{u} = \vec{e}_q + \vec{e}_{aq} + \vec{e}_{ad} + \vec{e}_\sigma - R\vec{i}.$$

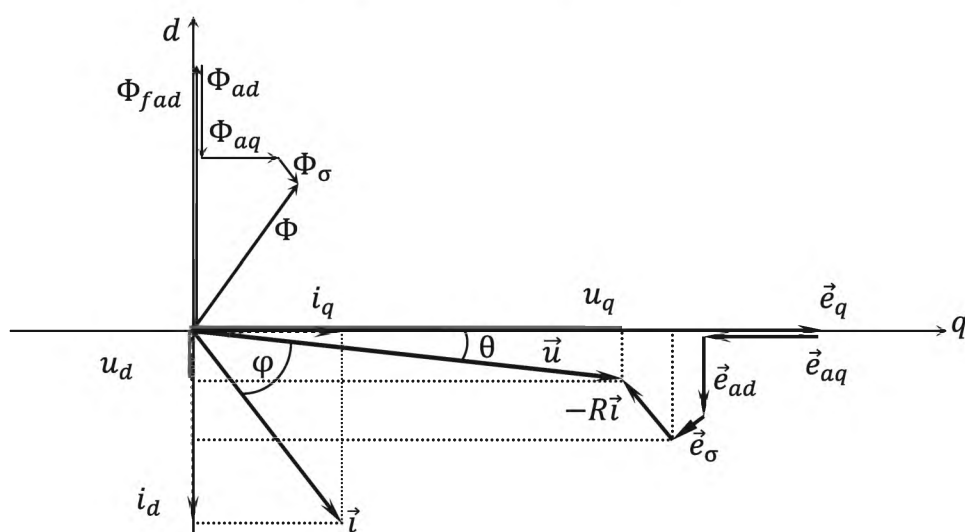


Рис. 4.18. Диаграмма установившегося режима синхронной машины в осях d, q

Проекции вектора напряжения u_d , u_q определяют модуль напряжения на зажимах генератора:

$$\begin{aligned} u &= \sqrt{u_q^2 + u_d^2}; \\ u_d + (x_{aq} + x_\sigma)i_q + Ri_d &= 0; \\ u_q - (x_{ad} + x_\sigma)i_d + Ri_q &= e_q. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Машина выдает мощность, напряжение отстает от e_q на угол $\theta < \pi/2$. Угол сдвига фаз между током и напряжением равен φ , при этом углы $\theta < 0$, $\varphi < 0$, т. к. откладываются по часовой стрелке. Составляющая напряжения u по оси d отрицательна ($u_d < 0$), $i_d < 0$, $u_q > 0$ и $i_q > 0$. Согласно рис. 4.19 легко можно записать:

$$\begin{aligned} u_q &= u \cos \theta; \\ u_d &= u \sin \theta; \\ i_q &= i \cos(\theta + \varphi); \\ i_d &= i \sin(\theta + \varphi). \end{aligned} \quad (4.18)$$

Подставив соотношения (4.18) в уравнение для u_d из системы (4.17), после ряда преобразований (раскладывая $\sin(\theta + \varphi)$ и $\cos(\theta + \varphi)$ на составляющие и разделив выражение на $\cos \theta$) получим

$$\theta = -\arctg \frac{x_q i \cos \varphi + Ri \sin \varphi}{u + Ri \cos \varphi - x_q i \sin \varphi}.$$

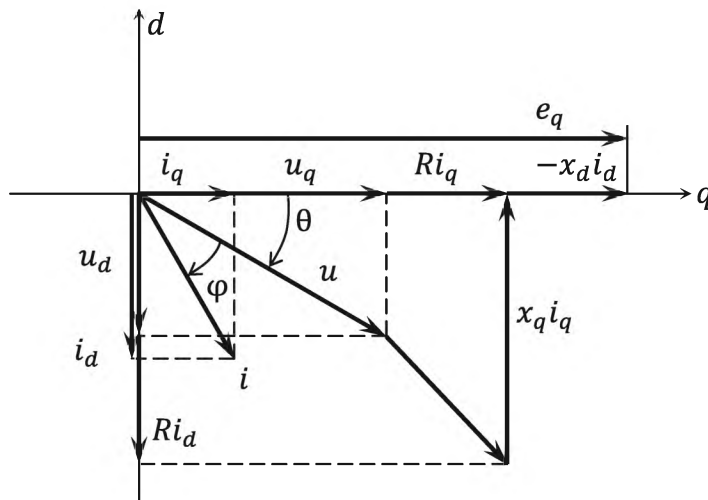


Рис. 4.19. Диаграмма токов и напряжений установившегося режима СМ

Кроме того, по выражениям (4.15), (4.16) $i_f = e_q/x_{ad}$ и $u_f = R_f i_f$.

Приведенные соотношения позволяют решать любые задачи анализа установившегося режима СМ. Электромагнитный момент по формуле (4.8) со с. 171 с учетом $\omega_c = 1$ сп. о. е. при $\psi_d = x_d i_d + e_q$ и $\psi_q = x_q i_q$ равен

$$M_{\Sigma} = i_q \psi_d - i_d \psi_q = e_q i_q + (x_d - x_q) i_d i_q.$$

Значения токов определяются из соотношений установившегося режима

$$\begin{aligned} e_q - u_q &= -x_d i_d + R i_q; \\ -u_d &= x_q i_q + R i_q. \end{aligned}$$

При $R = 0$

$$\begin{aligned} i_d &= -\frac{e_q - u_q}{x_d}; \\ i_q &= -\frac{u_d}{x_q}; \\ M_{\Sigma} &= -\frac{e_q u_d}{x_q} + \frac{(x_d - x_q)}{x_d x_q} \cdot (e_q u_d - u_q u_d) = \\ &= -\frac{e_q u}{x_d} \cdot \sin \theta - \frac{u^2 (x_d - x_q)}{2 x_d x_q} \cdot \sin 2\theta. \end{aligned}$$

Векторные диаграммы строят на комплексной плоскости, направление оси q совпадает с направлением оси $+j$, а направление действительной оси $+d$ совпадает с направлением $-d$.

При переходе от так называемой теоретической векторной диаграммы к практической произойдут следующие изменения переменных. Если в теоретической векторной диаграмме переменные u_d, i_d, u_q, i_q таковы, что $u_d < 0, i_d < 0, u_q > 0, i_q > 0$, и углы $\theta < 0, \varphi < 0$, то в практической векторной диаграмме переменные U_d, I_d, U_q, I_q будут $U_d > 0, I_d > 0, U_q > 0, I_q > 0$, при этом $\theta > 0, \varphi > 0$ (рис. 4.20).

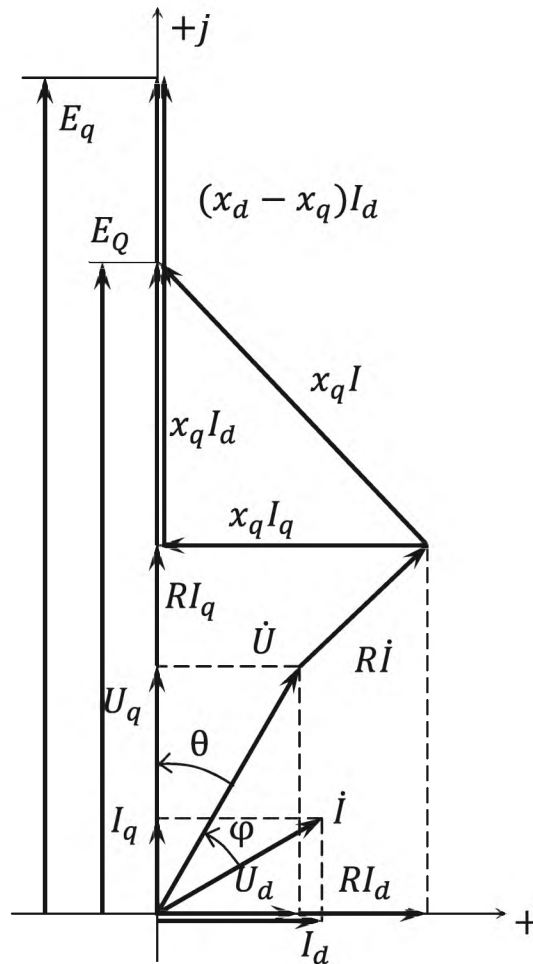


Рис. 4.20. Векторная диаграмма СМ на комплексной плоскости

Уравнения для статорных контуров, приведенных к осям d и q , имеют вид:

$$\begin{aligned}
 U_q &= U \cos \theta; \\
 U_d &= U \sin \theta; \\
 I_q &= I \cos(\theta + \varphi); \\
 I_d &= I \sin(\theta + \varphi); \\
 U &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2}; \\
 I &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2}; \\
 \theta &= \operatorname{arctg} \frac{x_q I \cos \varphi - R I \sin \varphi}{U + R I \cos \varphi + x_q I \sin \varphi}.
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

Уравнения для обмотки возбуждения имеют вид:

$$\begin{aligned} I_f &= E_q / x_{ad}; \\ U_f &= I_f R_f. \end{aligned} \quad (4.20)$$

В первом уравнении системы (4.20) вводится ЭДС за сопротивлением x_q , составляющая $x_d I_d$ может быть представлена суммой $x_d I_d = x_q I_d + (x_d - x_q) I_d$, тогда расчетная или фиктивная ЭДС E_Q

$$\begin{aligned} \dot{E}_Q &= \dot{U} + R \dot{I} + j x_q \dot{I}; \\ \operatorname{Re}(\dot{E}_Q) &= \operatorname{Re}(U_d + j U_q + R I_d + j R I_q + j I_d x_q - I_q x_q) = \\ &= U_d + R I_d - I_q x_q = 0; \end{aligned}$$

$$\operatorname{Im}(\dot{E}_Q) = E_Q = U_q + R I_q + x_q I_d.$$

Таким образом, E_Q по оси $+j$ совпадает по направлению с E_q , что позволяет использовать ее при построении векторных диаграмм,

$$E_q = E_Q + I_d (x_d - x_q).$$

В приближенных расчетах величина R часто не учитывается, тогда, если принять $R = 0$, векторная диаграмма будет такой, как показано на рис. 4.21.

Пользуясь полученными соотношениями, можно записать выражения для нахождения активной и реактивной мощности на зажимах генератора:

$$\begin{aligned} P_{\text{ген}} &= \operatorname{Re}(\dot{U} \hat{I}) = \operatorname{Re}[(U_d + j U_q)(I_d - j I_q)] = U_d I_d + U_q I_q = \\ &= \frac{x_q}{x_q^2 + R^2} E_Q U \sin \theta + \frac{R}{x_q^2 + R^2} (E_Q U \cos \theta - U^2); \\ Q_{\text{ген}} &= \operatorname{Im}(\dot{U} \hat{I}) = \operatorname{Im}[(U_d + j U_q)(I_d - j I_q)] = U_q I_d - U_d I_q = \\ &= \frac{x_q}{x_q^2 + R^2} (E_Q U \cos \theta - U^2) - \frac{R}{x_q^2 + R^2} E_Q U \sin \theta, \end{aligned} \quad (4.21)$$

где

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{x_q (E_Q - U_q) - R U_d}{x_q^2 + R^2}; \\ I_q &= \frac{x_q (E_Q - U_q) - R U_d}{x_q^2 + R^2}. \end{aligned} \quad (4.22)$$

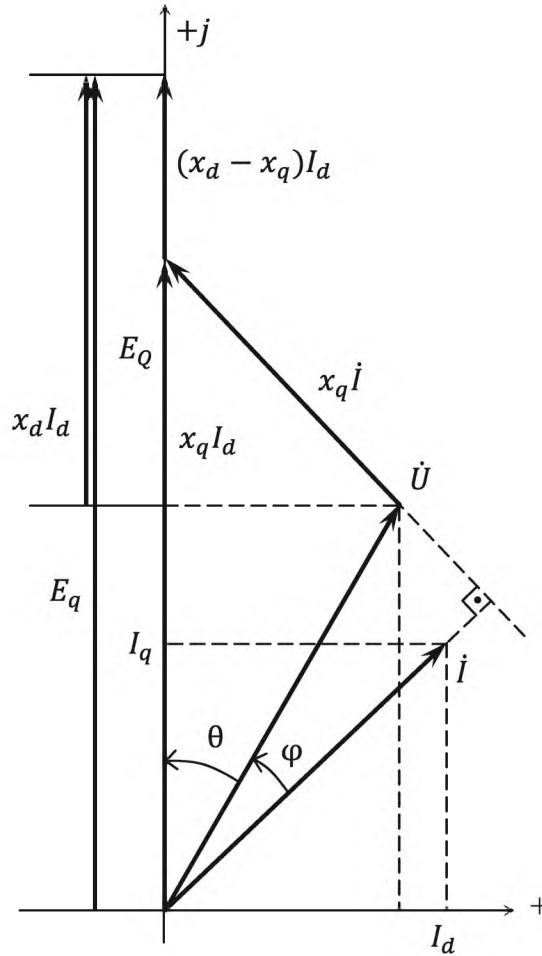


Рис. 4.21. Векторная диаграмма СМ
при $R = 0$

Соотношения вида (4.21) обычно используются при постоянстве E_Q , U и определяют так называемые угловые характеристики мощности синхронной машины. При неизменном токе возбуждения постоянными можно считать ЭДС E_q и U . Если принять R равным 0, то с учетом выражений (4.21) и (4.22) получим

$$E_Q = E_q \frac{x_q}{x_d} + U \frac{x_d - x_q}{x_d} \cos \theta.$$

$$P_{\text{ген}}(E_q) = \frac{E_q U}{x_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \sin 2\theta;$$

$$Q_{\text{ген}}(E_q) = \frac{E_q U}{x_d} \cos \theta + \frac{U^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \cos 2\theta - \frac{U^2}{2} \frac{x_d + x_q}{x_d x_q}.$$

4.5. Начальный момент переходного процесса в СМ. Внезапное изменение режима

Рассмотрим, как изменится баланс магнитных потоков, приведенный на рис. 4.17, если произошло, например, внезапное изменение потока продольной реакции статора на $\Delta\dot{\Phi}_{ad}$ (рис. 4.22). Согласно закону Ленца приращение потока $\Delta\dot{\Phi}_{ad}$ вызовет ответную реакцию обмотки возбуждения $\Delta\dot{\Phi}_f$, при этом приращения потокосцеплений $\Delta\dot{\Psi}_{ad}$ и $\Delta\dot{\Psi}_f$ должны компенсировать друг друга, т. е. $\Delta\dot{\Psi}_{ad} + \Delta\dot{\Psi}_f = 0$. С увеличением потока $\dot{\Phi}_f$ до $\dot{\Phi}'_f$ пропорционально ему увеличивается поток $\dot{\Phi}'_{\sigma f}$, что приводит к уменьшению потока $\dot{\Phi}'_{\delta f}$. Однако результирующий поток $\dot{\Phi}'_{\Sigma}$ сохраняет свое предшествующее значение. Другими словами, в первый момент внезапного нарушения режима результирующий поток $\dot{\Phi}_{\Sigma}$ не меняется, следовательно, изменение реакции якоря в роторе никак не проявляется. Результирующее потокосцепление определяется геометрической суммой потокосцеплений (в системе сп. о. е.):

$$\dot{\Psi}_{\Sigma} = \dot{\Psi}_f - \dot{\Psi}_{ad} = \dot{I}_f x_f - \dot{I}_d x_{ad}. \quad (4.23)$$

Потокосцепление статорной обмотки:

$$\dot{\Psi}_d = \dot{I}_f x_{ad} - \dot{I}_d x_d = \dot{I}_f x_{ad} - \dot{I}_d (x_{\sigma} + x_{ad}). \quad (4.24)$$

Выразив из формулы (4.23) величину $\dot{I}_f = (\dot{\Psi}_{\Sigma} + \dot{I}_d x_{ad})/x_f$ и подставив ее в выражение (4.24), получим

$$\dot{\Psi}_d = \frac{x_{ad}}{x_f} (\dot{\Psi}_{\Sigma} + \dot{I}_d x_{ad}) - \dot{I}_d x_d = \frac{x_{ad}}{x_f} \dot{\Psi}_{\Sigma} - \dot{I}_d \left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} \right).$$

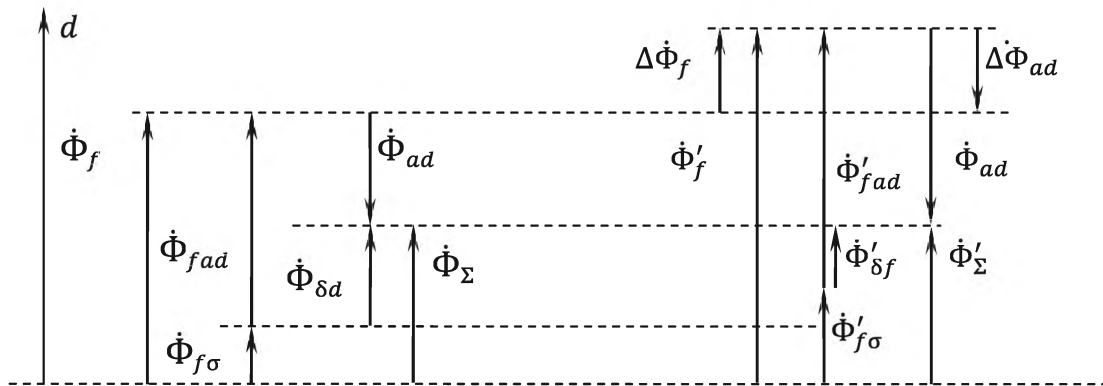


Рис. 4.22. Магнитные потоки СМ в установившемся режиме и в начальный момент КЗ (по оси d)

При неизменной частоте вращения ротора синхронного генератора напряжение U_q пропорционально потокосцеплению обмотки статора Ψ_d , а в относительных единицах равно ему, $U_{q(*)} = \Psi_{d(*)}$.

$$U_{q(*)} = \frac{x_{ad}}{x_f} \Psi_{\Sigma} - I_d \left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} \right); \quad (4.25)$$

$$U_q = E'_q - I_d x'_d,$$

где E'_q — переходная ЭДС синхронной машины, $E'_q = (x_{ad}/x_f) \Psi_{\Sigma}$; x'_d — переходное индуктивное сопротивление СМ по продольной оси. ЭДС является расчетной, т. е. ее невозможно измерить физически, ее величина пропорциональна полному потокосцеплению обмотки возбуждения.

Переходное индуктивное сопротивление x'_d , которое можно найти в соответствии с выражением (4.25),

$$x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} = x_{\sigma} + x_{ad} - \frac{x_{ad}^2}{x_{f\sigma} + x_{ad}} =$$

$$= x_{\sigma} + \frac{x_{ad}^2 + x_{ad}x_{f\sigma} - x_{ad}^2}{x_{f\sigma} + x_{ad}} = x_{\sigma} + \frac{x_{ad}x_{f\sigma}}{x_{f\sigma} + x_{ad}},$$

является паспортной характеристикой СМ. Данное сопротивление представляет собой результирующую индуктивность статорной обмотки при замкнутой обмотке возбуждения (и при разомкнутых демпферных).

Величина переходного индуктивного сопротивления по оси q совпадает с величиной синхронного индуктивного сопротивления по этой оси при разомкнутой демпферной обмотке, т. е. $x'_q = x_q$. Соответствующие схемы замещения, полученные в указанных условиях из схем рис. 4.11 и 4.12 со с. 174–175, представлены на рис. 4.23.

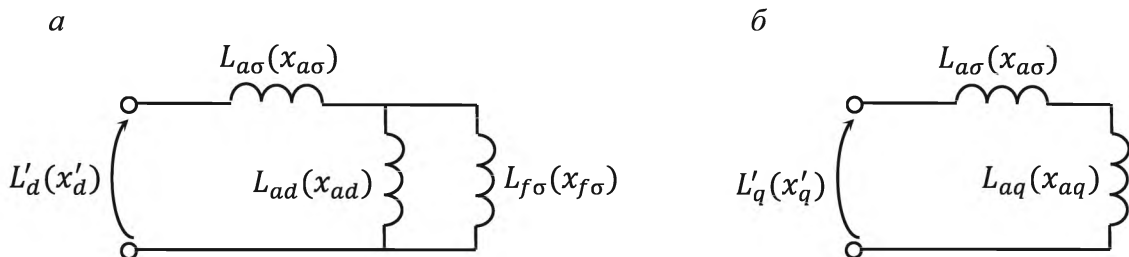
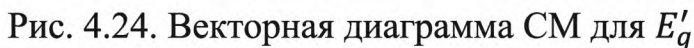


Рис. 4.23. Схемы замещения для определения переходных индуктивностей СМ по оси d (а) и оси q (б)

Из векторной диаграммы (рис. 4.24) видно, что вектор \dot{E}'_q совпадает с вектором \dot{E}_q по направлению, а его значение меньше последнего на $I_d(x_d - x'_d)$. Оставаясь неизменной в начальный момент внезапного нарушения режима, переходная ЭДС E'_q позволяет связать предшествующий режим с новым режимом машины – в этом заключается ее практическая ценность. Дает возможность оценить внезапный переход от одного режима к другому E'_q совместно с x'_d .



190

явнополюсной СМ без демпферных обмоток (и других аналогичных контуров) внезапно произошло изменение сопротивления цепи статора (при этом внешнее сопротивление $x_{вн}$ является чисто индуктивным), то начальное значение периодической составляющей тока возникшего переходного процесса, или так называемый начальный переходный ток, будет только продольным и составит

$$I'_{d(0)} = \frac{E'_{q(0)}}{x'_d + x_{вн}}.$$

Поскольку вдоль поперечной оси токов нет, то явнополюсная машина в переходном режиме может быть представлена ЭДС E'_q за сопротивлением x'_d (рис. 4.25).

В дальнейшем E'_q будет изменяться по экспоненциальному закону с постоянной времени $T_{d0} = L_f/R_f$, стремясь к значению, соответствующему установившемуся току возбуждения (рис. 4.26).

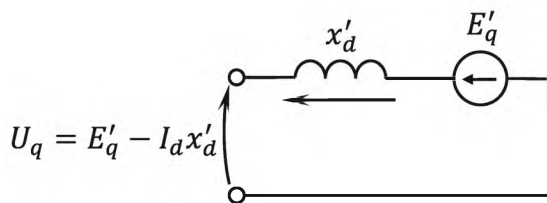


Рис. 4.25. Схема замещения

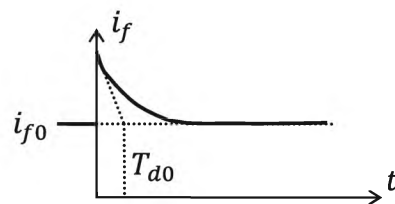


Рис. 4.26. Изменение тока возбуждения

Следует учесть тот факт, что у явнополюсных синхронных машин на роторе, кроме обмотки возбуждения, находятся успокоительные обмотки D (продольная) и Q (поперечная). У неявнополюсных машин (турбогенераторов) как таковых успокоительных обмоток нет, их роль выполняют проводники, замкнутые контуры, появляющиеся в массивном теле ротора. Если же генератор явнополюсный, то в нем успокоительные обмотки выполняются в виде стержней, закороченных с обоих концов. Источников напряжения и токов в нормальных режимах для этих обмоток нет. Назначение успокоительных обмоток — гашение свободных колебаний (качания ротора). Во время переходного процесса в обмотках ротора, а также в самом роторе наводятся свободные токи. При их взаимодействии с магнитным полем статора появляется успокоительный момент, стремящийся восстановить синхронную скорость вращения генератора. Наличие успокоительных обмоток уменьшает электрическую несимметрию ротора во время переходного процесса. При наличии демпферных обмоток

компенсация реакции статора продольной оси машины обеспечивается токами не только в обмотке возбуждения, как было рассмотрено ранее (см. рис. 4.22), но и в демпферных обмотках. Внезапное приращение $\Delta\Phi_{ad}$ вызовет ответную реакцию ротора, которая образуется из приращений потоков обмотки возбуждения $\Delta\Phi_f$ и продольной (демпферной) $\Delta\Phi_D$.

При резком изменении режима в обмотках статора появляются ΔI_d и ΔI_q , или составляющие тока реакции статора (рис. 4.27), создаются потоки реакции якоря. Следовательно, в обмотках ротора наводятся свободные токи, которые создают потоки, направленные навстречу изменениям реакции якоря:

$$\Delta I_d \rightarrow \Delta\Phi_{ad} \rightarrow \Delta I_f,$$

$$\Delta I_D \rightarrow \Delta\Phi_f, \Delta\Phi_D.$$

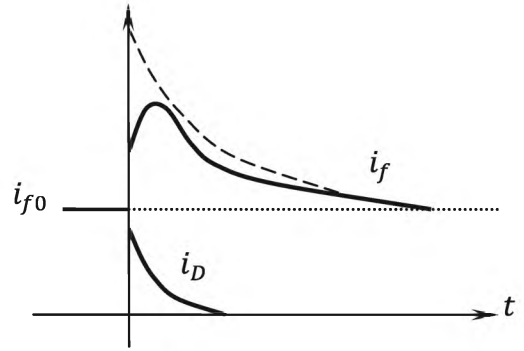


Рис. 4.27. Токи в продольных роторных обмотках

Аналогично этому выражению можно записать, что

$$\Delta I_q \rightarrow \Delta\Phi_{aq} \rightarrow \Delta I_Q \rightarrow \Delta\Phi_f, \Delta\Phi_Q.$$

Здесь $\Delta\Phi_{ad}$ и $\Delta\Phi_{aq}$ появляются как реакция статора, а $\Delta\Phi_f$, $\Delta\Phi_D$, $\Delta\Phi_Q$ — как ответная реакция ротора, причем они (реакция статора и реакция ротора) направлены навстречу друг другу.

Баланс результирующих потокосцеплений сохраняется неизменным:

$$\Delta I_f(x_{f\sigma} + x_{ad}) + \Delta I_D x_{ad} + \Delta I_d x_{ad} = 0; \quad (4.26)$$

$$\Delta I_D(x_{D\sigma} + x_{ad}) + \Delta I_f x_{ad} + \Delta I_d x_{ad} = 0. \quad (4.27)$$

Выражение (4.26) соответствует балансу потокосцеплений для обмотки возбуждения, а выражение (4.27) составлено для продольной демпферной обмотки. Приравняв левые части выражений (4.26) и (4.27), получим соотношение между токами обмотки возбуждения и продольной демпферной обмотки:

$$\Delta I_f x_{f\sigma} = \Delta I_D x_{D\sigma}, \quad (4.28)$$

где ΔI_f — приведенный к статору скачок тока возбуждения; $x_{f\sigma}$ и $x_{D\sigma}$ — реактивности рассеяния обмоток возбуждения и продольной

При трехфазном КЗ на выводах генератора $U_q = 0$; если $E''_{q(0)} = U_{q(0)} + I_{d(0)}x''_d$, то $I_{d(0)} = E''_{q(0)}/x''_d$.

$$E''_{d(0)} = U_{d(0)} + I_{q(0)}x''_q.$$

Таким образом, в начальный момент внезапного нарушения режима машину с демпферными обмотками (или демпферными контурами) полностью характеризуют реактивности x''_d и x''_q , ЭДС $E''_{d(0)}$ и $E''_{q(0)}$. Реактивные сопротивления учитывают влияние демпферных обмоток (или эквивалентных им контуров), являются характерными для машины и приводятся в паспортных данных, а сверхпереходные ЭДС — это расчетные условные величины.

4.6. Симметричное КЗ на зажимах статора синхронной машины

Для того чтобы узнать параметры переходного режима, а именно, как изменяются токи и напряжения, надо решать полученные уравнения (4.19) со с. 185 с учетом изменения параметров во времени. Согласно [6] режим КЗ синхронной машины можно рассматривать как результат наложения друг на друга двух режимов — исходного установившегося с известными параметрами и режима, в котором к статорным обмоткам d и q будут приложены напряжения $\Delta u_d = -u_{d(0)}$ и $\Delta u_q = -u_{q(0)}$. В этом случае результирующие напряжения статора будут равны нулю ($u_d = 0$, $u_q = 0$), как и должно быть при трехфазном КЗ. В таком случае изменение во времени любой режимной переменной $\varepsilon(t)$ можно представить в виде

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon(t).$$

Поскольку параметры установившегося режима известны, то для анализа режима КЗ необходимо определить значения $\Delta\varepsilon(t)$, причем в начальный момент времени $\Delta\varepsilon_0 = 0$, т. к. физические величины не могут изменяться скачком, за исключением $\Delta U_{d(0)}$, $\Delta U_{q(0)}$, которые в соответствии со сделанным предположением о мгновенной коммутации статорных цепей изменяются мгновенно.

Рассматривается только электромагнитный переходный процесс, поэтому скорость вращения ротора СМ считается постоянной и в от-

носительных единиц равна 1, а поскольку замыкание симметричное, то составляющие i_0 , u_0 , ψ_0 равны 0.

Применяя преобразование Лапласа и записывая операторные уравнения для приращений переменных, на основании исходных уравнений Парка–Горева (4.9) с учетом равенства нулю начальных значений приращений можно получить приближенные выражения для определения составляющих токов $i_{dk}(t)$, $i_{qk}(t)$ в режиме КЗ:

$$\begin{aligned} i_{dk}(t) &= i_{d(0)} - \frac{u_{q(0)}}{x_d(t)} + \frac{u_{(0)}}{x_d''} e^{-t/T_a} \cos(\omega t - \theta_{(0)}); \\ i_{qk}(t) &= i_{q(0)} + \frac{u_{d(0)}}{x_q(t)} + \frac{u_{(0)}}{x_q''} e^{-t/T_a} \sin(\omega t - \theta_{(0)}), \end{aligned} \quad (4.29)$$

где $i_{d(0)}$ и $i_{q(0)}$ — значения токов в предшествующем КЗ установившемся режиме; T_a — постоянная времени замкнутой накоротко обмотки статора. Это время, в течение которого апериодическая составляющая тока при замкнутой накоротко обмотке статора затухает до $1/e = 0,368$ от своего начального значения после внезапного изменения режима работы машины.

$$\begin{aligned} u_{(0)} &= \sqrt{u_{d(0)}^2 + u_{q(0)}^2}; \\ \theta_{(0)} &= \operatorname{arctg} \frac{u_{d(0)}}{u_{q(0)}}; \\ \frac{1}{x_d(t)} &= \frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T_d'} + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-t/T_d''}; \\ \frac{1}{x_q(t)} &= \frac{1}{x_q} + \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) e^{-t/T_q'}; \\ T_a &= \frac{2L_d''L_q''}{R(L_d'' + L_q'')}. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Реактивные сопротивления в системе (4.30) рассчитаны при частоте, равной синхронной. Постоянные времени рассчитываются по выражениям (4.13), (4.14) и (4.12).

Анализируя выражения (4.29) и (4.30), можно видеть, что токи $i_{dk}(t)$ и $i_{qk}(t)$ содержат апериодические и периодические составляющие. Апериодические составляющие можно определить как

$$i_{dк}^a(t) = i_{d(0)} - \frac{u_{q(0)}}{x_d(t)};$$

$$i_{qк}^a(t) = i_{q(0)} + \frac{u_{d(0)}}{x_q(t)}.$$

Однако если задать некоторые расчетные ЭДС вида

$$e_q(t) = u_{q(0)} - i_{d(0)}x_d(t);$$

$$e_d(t) = u_{d(0)} + i_{q(0)}x_q(t),$$

то апериодические составляющие токов можно выразить в виде

$$i_{dк}^a(t) = -e_q(t)/x_d(t);$$

$$i_{qк}^a(t) = e_d(t)/x_q(t).$$

В начальный момент времени ($t = 0$) значения сопротивлений из формулы (4.30) равны сверхпереходным значениям $x_d(t = 0) = x_d''$, $x_q(t = 0) = x_q''$, расчетные ЭДС совпадают со сверхпереходными ЭДС синхронной машины, определенными без учета активного сопротивления в режиме, предшествующем КЗ:

$$e_q(t = 0) = e_{q(0)}'' = u_{q(0)} - i_{d(0)}x_d'';$$

$$e_d(t = 0) = e_{d(0)}'' = u_{d(0)} - i_{q(0)}x_q''.$$

Очевидно, что установившиеся значения расчетных ЭДС будут

$$e_q(t \rightarrow \infty) = u_{q(0)} - i_{d(0)}x_d = e_{q(0)};$$

$$e_d(t \rightarrow \infty) = u_{d(0)} - i_{q(0)}x_q = 0.$$

Периодические составляющие токов $i_{dк}(t)$ и $i_{qк}(t)$ — это

$$i_{dк}^п(t) = \frac{u_{(0)}}{x_d''} e^{-t/T_a} \cos(\omega t - \theta_{(0)});$$

$$i_{qк}^п(t) = \frac{u_{(0)}}{x_q''} e^{-t/T_a} \sin(\omega t - \theta_{(0)}).$$

Они представляют собой гармонические колебания с амплитудой, затухающей во времени по экспоненциальному закону.

Для нахождения фазных токов статорной обмотки необходимо воспользоваться преобразованием Blondеля (4.5) со с. 165, тогда ток в фазе A статора будет

$$\begin{aligned} i_{Ak}(t) &= 1 \cdot 0 + i_{dk}(t) \cos \gamma + i_{qk}(t) \sin \gamma = \\ &= \left[i_{d(0)} - \frac{u_{q(0)}}{x_d(t)} + \frac{u_{(0)}}{x_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\omega t - \theta_{(0)}) \right] \cos(\omega t + \gamma_0) + \\ &+ \left[i_{q(0)} + \frac{u_{d(0)}}{x_q(t)} + \frac{u_{(0)}}{x_q''} e^{-\frac{t}{T_a}} \sin(\omega t - \theta_{(0)}) \right] \sin(\omega t + \gamma_0). \end{aligned} \quad (4.31)$$

После ряда преобразований выражение (4.31) можно привести к виду

$$i_{Ak}(t) = i_{A0}(t) + \Delta i_{A\omega}(t) + \Delta i_{Aa}(t) + \Delta i_{A2\omega}(t), \quad (4.32)$$

где $i_{A0}(t)$ — периодическая составляющая (рабочей частоты) тока предшествующего режима с постоянными амплитудой и фазой,

$$i_{A0}(t) = \sqrt{i_{d(0)}^2 + i_{q(0)}^2} \cos \left(\omega t + \gamma_0 - \operatorname{arctg} \frac{i_{d(0)}}{i_{q(0)}} \right);$$

$\Delta i_{A\omega}(t)$ — периодическая составляющая рабочей частоты с переменными амплитудой и фазой

$$\Delta i_{A\omega}(t) = \sqrt{\left(\frac{u_{q(0)}}{x_d(t)} \right)^2 + \left(\frac{u_{d(0)}}{x_q(t)} \right)^2} \cos(\omega t + \gamma_0 + \varepsilon(t)).$$

Переменная фаза определяется как

$$\varepsilon(t) = \operatorname{arctg} \left(\frac{u_{d(0)} x_d(t)}{u_{q(0)} x_q(t)} \right).$$

Третье и четвертое слагаемые, входящие в формулу (4.32), — это аperiodическая составляющая вида

$$\Delta i_{Aa}(t) = \left[\frac{u_{(0)}}{2} \left(\frac{1}{x_d''} + \frac{1}{x_q''} \right) \cos(\gamma_0 + \theta_{(0)}) \right] e^{-t/T_a}$$

и периодическая составляющая двойной частоты с экспоненциально затухающей амплитудой и постоянной фазой

$$\Delta i_{A2\omega}(t) = \frac{u_{(0)}}{2} \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_q''} \right) e^{-t/T_a} \cos(2\omega t + \gamma_0 + \theta_{(0)}).$$

В успокоительных роторных обмотках до КЗ ток был равен нулю, а в обмотке возбуждения — ток $i_{f(0)}$. В режиме КЗ ток в обмотке возбуждения может быть найден как

$$i_{fk}(t) = i_{f(0)} + \frac{1}{x_d''} \frac{L_{ad}L_{D\sigma}}{\sigma_{fD}L_fL_D} \times \\ \times \left[u_{q(0)} \frac{T_d''(T_d' - T_{D\sigma})}{T_{D\sigma}(T_d' - T_d'')} e^{-\frac{t}{T_d'}} - \right. \\ \left. - u_{q(0)} \frac{T_d'(T_d'' - T_{D\sigma})}{T_{D\sigma}(T_d' - T_d'')} e^{-\frac{t}{T_d''}} - u_{(0)} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\omega t - \theta_{(0)}) \right],$$

где $T_{D\sigma}$ — постоянная времени рассеяния продольной демпферной обмотки, $T_{D\sigma} = L_{D\sigma}/R_D$. При $T_{f\sigma} = L_{f\sigma}/R_f$ токи в продольной и поперечной демпферной обмотке равны

$$i_{Dk}(t) = \frac{1}{x_d''} \frac{L_{ad}L_{f\sigma}}{\sigma_{fD}L_fL_D} \times \\ \times \left[u_{q(0)} \frac{T_d''(T_d' - T_{f\sigma})}{T_{f\sigma}(T_d' - T_d'')} e^{-\frac{t}{T_d'}} - \right. \\ \left. - u_{q(0)} \frac{T_d'(T_d'' - T_{f\sigma})}{T_{f\sigma}(T_d' - T_d'')} e^{-\frac{t}{T_d''}} - u_{(0)} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\omega t - \theta_{(0)}) \right]. \\ i_{Qk}(t) = -\frac{1}{x_q''} \frac{L_{aq}}{L_Q} \left[u_{d(0)} e^{-\frac{t}{T_Q'}} + u_{(0)} e^{-\frac{t}{T_a}} \sin(\omega t - \theta_{(0)}) \right].$$

Как можно видеть, токи в роторных обмотках содержат как апериодические, так и периодические составляющие.

Качественный анализ переходного процесса в СМ. С целью проанализировать характер изменения токов в СМ в переходном режиме рассмотрим еще раз КЗ в цепи статора (на выводах генератора). Ток генератора в момент возникновения замыкания был равен $i_{(0)}$. Полный ток мгновенно измениться не может, поэтому $i_{п(0)} + i_{a(0)} = i_{(0)}$.

Поскольку у СМ ротор вращается, то переходный процесс оказывается сложным и помимо двух рассматриваемых составляющих тока имеются и другие. Теория переходных процессов в синхронных машинах позволяет рассматривать отдельно действие составляющих полного тока статорной обмотки, поэтому считается возможным скачкообразное изменение составляющих (периодическая и аperiodическая). Другими словами, в синхронной машине в начальный момент КЗ аperiodическая составляющая тока статора $i_a(t)$ скачкообразно возрастает от нуля до некоторого значения, периодическая составляющая $i_{\pi}(t)$ возрастает скачком на такое же значение, но с обратным знаком.

Рассмотрим скачкообразное увеличение амплитуды периодической составляющей тока. В этом случае скачкообразно возрастет поток реакции статора Φ_{ad} , который и определяется периодическими токами статорных обмоток, точнее, продольной составляющей тока статора (направлен встречно потоку ротора и неподвижен относительно ротора). Данный поток сцепляется с обмоткой возбуждения и продольной успокоительной обмоткой. Из-за постоянства потокосцепления обмотки ротора, обладающей в машине наибольшей индуктивностью, суммарный поток ротора мгновенно измениться не может. По этой причине в момент КЗ он остается неизменным, что обеспечивается появлением в обмотках свободных аperiodических токов такого направления и величины, что в момент возникновения КЗ они обуславливают появление встречного для Φ_{ad} потока. Изменение токов в обмотках возбуждения и продольной успокоительной носит аperiodический характер и приводит к возникновению дополнительного поля, которое вытесняет поле статора в воздушный зазор, имеющий низкую магнитную проводимость, что приводит

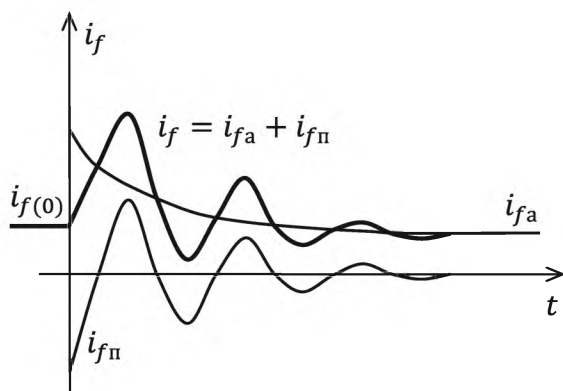


Рис. 4.29. Изменения тока в обмотке возбуждения

к дополнительному изменению периодических токов статора.

Характер изменения токов в обмотке возбуждения показан на рис. 4.29.

Если бы у обмоток ротора рассеяние отсутствовало, то изменения потоков в начальный момент времени компенсировали бы друг друга. В результате этого ответная

реакция ротора вытеснила бы полностью реакцию статора. Так как в действительности рассеяние всегда есть, то реакция статора частично проникает в тело ротора в начальный момент. На пути этого потока создается большое магнитное сопротивление, следовательно, индуктивное сопротивление будет мало и равно сверхпереходному x_d'' . С течением времени свободные токи в роторных обмотках будут затухать — сначала в продольной демпферной, затем в обмотке возбуждения, — следовательно, будет затухать ответная реакция ротора, поэтому реакция статора Φ_{ad} будет все сильнее проникать в тело ротора, а индуктивное сопротивление статорных обмоток будет увеличиваться от x_d'' до x_d' и x_d (см. рис. 4.30). Энергия поля переходит в тепловую, и процесс затухает. Переходный апериодический ток в обмотке возбуждения i_{fa} (рис. 4.29) уменьшается до некоторого постоянного значения, зависящего от напряжения возбудителя, следовательно, периодические составляющие статорных токов тоже уменьшаются до некоторого установившегося значения. Постоянная времени затухания тока i_{fa} зависит от активного сопротивления обмотки возбуждения.

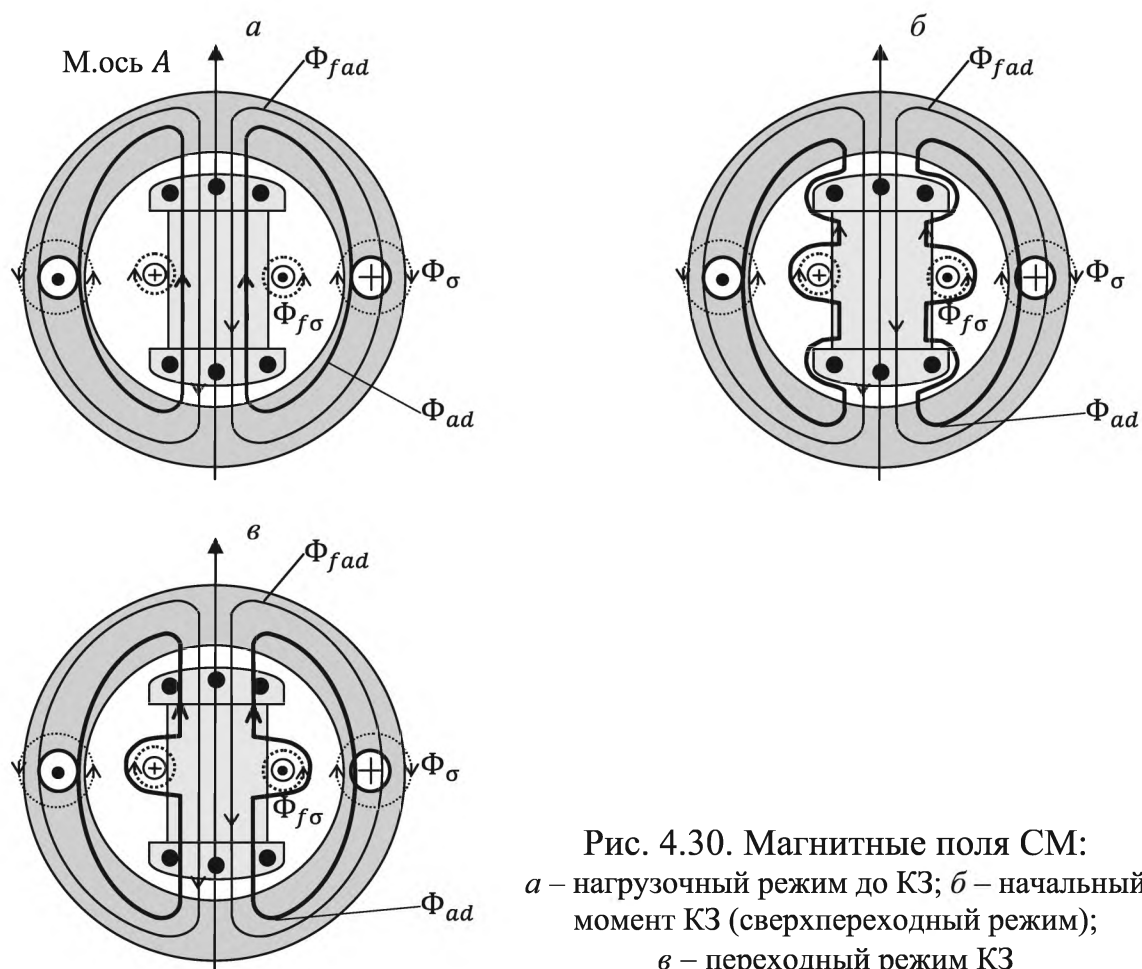


Рис. 4.30. Магнитные поля СМ:
а – нагрузочный режим до КЗ; б – начальный момент КЗ (сверхпереходный режим);
в – переходный режим КЗ

Поток, создаваемый апериодической составляющей фазного тока, неподвижен относительно статора, действие его на ротор имеет пульсирующий характер и среднее значение равно нулю. Во вращающемся роторе индуцируется периодическая ЭДС, и в обмотках ротора появляется периодический ток с экспоненциально уменьшающейся амплитудой $i_{fп}$ (рис. 4.29). Созданный этим током магнитный поток почти полностью компенсирует продольную составляющую неподвижного поля статора, проходит по путям рассеяния и не сцепляется с обмотками статора.

Поле, созданное апериодическими составляющими фазных токов, проходит по пути, который зависит от положения ротора. По мере вращения ротора магнитная проницаемость этого пути изменяется с двойной частотой (при одном повороте ротора поле дважды

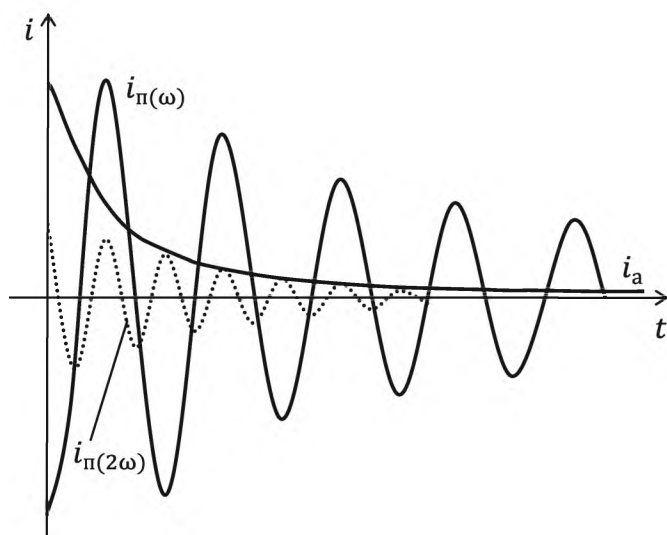


Рис. 4.31. Изменения тока в статорной обмотке

проходит по оси d и дважды по оси q). Для поддержания такого поля неизменным намагничивающая составляющая токов статора должна содержать составляющую двойной частоты, в противном случае поле будет колебаться с двойной частотой. Таким образом, в токе статора появляется составляющая двойной частоты с затухающей амплитудой (рис. 4.31).

Расчетный пример к главе 4

Определить характеристики переходного процесса при трехфазном КЗ на зажимах статора турбогенератора ТГВ-200, для которого $i_{f\text{ х.х}} = 0,72$ кА, остальные номинальные данные и параметры следующие: $S_{\text{ном}} = 235,3$ МВ·А; $U_{\text{ном}} = 15,75$ кВ; $I_{\text{ном}} = 8,626$ кА; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$; сопротивления, о. н. е., $R_* = 0,001\,35$, $R_{f*} = 0,001\,184$, $R_{D*} = 0,003\,46$, $R_{Q*} = 0,001\,826$, $x_{a\sigma*} = 0,165$, $x_{ad*} = 1,685$, $x_{aq*} = 1,685$, $x_{f\sigma*} = 0,1154$, $x_{D\sigma*} = 0,076$, $x_{Q\sigma*} = 0,125$.

Все расчеты выполняются в системе именованных единиц.

На первом этапе определяются параметры синхронного генератора в нормальном режиме. Согласно выражениям (4.10) и (4.11) со с. 177 для неявнополюсного турбогенератора синхронные реактивные сопротивления продольной и поперечной реакции статора составляют

$$x_{d*} = x_{q*} = x_{a\sigma*} + x_{ad*} = 0,165 + 1,685 = 1,85 \text{ о. н. е.};$$

$$x_d = x_q = x_{d*} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = 1,85 \cdot \frac{15,75^2}{235,3} = 1,95 \text{ Ом.}$$

Остальные сопротивления СМ в именованных единицах, приведенные к статорной обмотке, будут равны:

– индуктивное сопротивление реакции статора

$$x_{ad} = 1,685 \cdot \frac{15,75^2}{235,3} = 1,776 \text{ Ом};$$

– индуктивное сопротивление рассеяния статора $x_{a\sigma} = 0,174 \text{ Ом};$

– сопротивление рассеяния обмотки возбуждения $x_{f\sigma} = 0,122 \text{ Ом},$

$$x_{f*} = x_{ad*} + x_{f\sigma*} = 1,685 + 0,1154 = 1,8004 \text{ о. н. е.};$$

$$x_f = 1,776 + 0,122 = 1,898 \text{ Ом.}$$

Подобным образом рассчитываются сопротивления рассеяния эквивалентных демпферных обмоток — продольной и поперечной, а также индуктивные сопротивления:

$$x_{D\sigma} = x_{D\sigma*} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = 0,076 \cdot \frac{15,75^2}{235,3} = 0,080 \text{ Ом};$$

$$x_{Q\sigma} = x_{Q\sigma*} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = 0,125 \cdot \frac{15,75^2}{235,3} = 0,1318 \text{ Ом};$$

$$x_D = x_{ad} + x_{D\sigma} = 1,776 + 0,080 = 1,856 \text{ Ом } (x_{D*} = 1,761 \text{ о. н. е.});$$

$$x_Q = x_{ad} + x_{Q\sigma} = 1,776 + 0,1318 = 1,908 \text{ Ом } (x_{Q*} = 1,81 \text{ о. н. е.}).$$

Активные сопротивления:

$R_f = 0,001\,248\text{ Ом}$ — обмотки возбуждения;

$R = 0,001\,426\text{ Ом}$ — статорных обмоток;

$R_D = 0,003\,65\text{ Ом}$ — продольной демпферной;

$R_Q = 0,001\,826\text{ Ом}$ — поперечной демпферной обмотки.

В установившемся режиме на зажимах синхронного генератора имеется фазное напряжение $U_{(0)} = U_{\text{ном}}/\sqrt{3} = 15,75/\sqrt{3} = 9,104\text{ кВ}$, ток в фазе $I_{(0)} = 8,626\text{ кА}$, коэффициент мощности $\cos \varphi_{(0)} = 0,85$. Угол сдвига фаз между векторами напряжения и тока составляет $\varphi_{(0)} = 31,79^\circ$ (рассматривается приближенная векторная диаграмма, аналогичная показанной на рис. 4.21 на с. 187). Рабочий угол синхронной машины $\theta_{(0)}$ определяется по выражению (4.19) со с. 185 без учета активного сопротивления:

$$\begin{aligned}\theta_{(0)} &= \arctg \frac{x_q I_{(0)} \cos \varphi_{(0)}}{U_{(0)} + x_q I_{(0)} \sin \varphi_{(0)}} = \\ &= \arctg \frac{1,95 \cdot 8,626 \cdot 0,85}{9,093 + 1,95 \cdot 8,626 \cdot 0,527} = 38,53^\circ.\end{aligned}$$

Векторная диаграмма нормального режима при $R = 0$ представлена на рис. 4.32. Согласно формуле (4.19) параметры нормального режима, приведенные к напряжению ступени статорной обмотки, будут равны:

$$U_d = U_{(0)} \sin \theta_{(0)} = 9,093 \sin 38,53 = 5,664\text{ кВ};$$

$$U_q = U_{(0)} \cos \theta_{(0)} = 9,093 \cos 38,53 = 7,113\text{ кВ};$$

$$I_d = I_{(0)} \sin(\theta_{(0)} + \varphi_{(0)}) = 8,626 \sin(38,53 + 31,79) = 8,122\text{ кА};$$

$$I_q = I_{(0)} \cos(\theta_{(0)} + \varphi_{(0)}) = 8,626 \cos(38,53 + 31,79) = 2,905\text{ кА},$$

$E_q = U_q + x_d I_d = 7,113 + 1,95 \cdot 8,122 = 22,951\text{ кВ}$ (знак «+» соответствует приближенной векторной диаграмме на рис. 4.32).

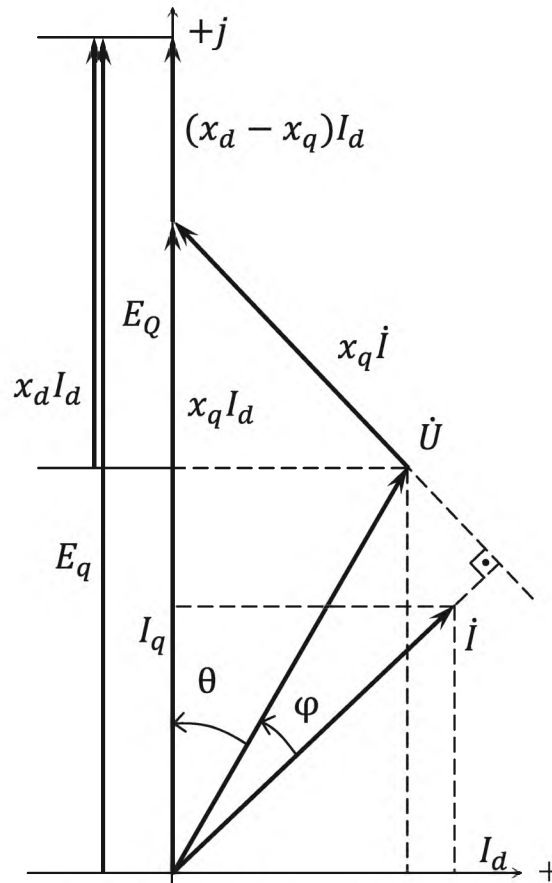


Рис. 4.32. Векторная диаграмма

Ток возбуждения, приведенный к статорной обмотке,

$$I_f = E_q / x_{ad} = 12,92 \text{ кА.}$$

Для определения тока в обмотке возбуждения и напряжения на ее выводах следует выполнить расчет базисного значения тока обмотки возбуждения, для чего необходимы значения некоторых параметров, выраженные в относительных единицах:

$$u_{q*} = u_{(0)*} \cos \theta_{(0)} = 1 \cos 38,51^\circ = 0,782 \text{ о. е.,}$$

где $u_{(0)*} = 1 \text{ о. е.}$, $i_{(0)*} = 1 \text{ о. е.}$ В таком случае

$$i_{d*} = i_{(0)*} \sin(\theta_{(0)} + \varphi_{(0)}) = 1 \sin(38,51^\circ + 31,79^\circ) = 0,941 \text{ о. е.,}$$

$$e_{q*} = u_{q*} + x_{q*} i_{d*} = 0,782 + 1,85 \cdot 0,941 = 2,523 \text{ о. е.,}$$

$$i_{f*} = e_{q*} / x_{ad*} = 2,523 / 1,685 = 1,497 \text{ о. е.}$$

Базисный ток обмотки возбуждения определяется с учетом коэффициента спрямления нелинейной характеристики $u(i_f)$,

$$i_{fB} = i_{fxx} \frac{x_{ad*}}{c} = \frac{0,72 \cdot 1,685}{1,1} = 1,103,$$

где i_{fxx} — ток обмотки возбуждения холостого хода; c — коэффициент, учитывающий нелинейную зависимость $u(i_f)$, принят равным 1,1.

Проведем пересчет i_f и r_f к базисным единицам ротора:

$$i_f = i_{f*} i_{fB} = 1,498 \cdot \frac{0,72 \cdot 1,685}{1,1} = 1,652 \text{ кА};$$

$$r_f = r_{f*} \frac{S_6 c^2}{i_{fxx}^2 x_{ad*}^2} = \frac{9,093 \cdot 8,626 \cdot 1,1^2}{1,652^2 \cdot 1,685^2} = 0,229 \text{ Ом};$$

$$u_f = r_f i_f = 0,378 \text{ кВ}.$$

В переходном процессе синхронная машина характеризуется параметрами:

— реактивные сопротивления, Ом:

$$x'_d = x_{a\sigma} + \left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{f\sigma}} \right)^{-1} =$$

$$= 0,174 + \left(\frac{1}{1,776} + \frac{1}{0,122} \right)^{-1} = 0,288;$$

$$x'_{ad} = \left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{a\sigma}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{1,776} + \frac{1}{0,174} \right)^{-1} = 0,158;$$

$$x'_f = x_{f\sigma} + x'_{ad} = 0,122 + 0,158 = 0,28;$$

$$x'_D = x_{D\sigma} + x'_{ad} = 0,080 + 0,158 = 0,238;$$

$$x'_Q = x_{Q\sigma} + x'_{aq} = 0,1318 + 0,158 = 0,29;$$

$$x''_d = x_{a\sigma} + \left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{f\sigma}} + \frac{1}{x_{D\sigma}} \right)^{-1} =$$

$$= 0,174 + \left(\frac{1}{1,776} + \frac{1}{0,122} + \frac{1}{0,238} \right)^{-1} = 0,221;$$

$$x_q'' = x_{a\sigma} + \left(\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{Q\sigma}} \right)^{-1} =$$

$$= 0,174 + \left(\frac{1}{1,776} + \frac{1}{0,1318} \right)^{-1} = 0,297;$$

– постоянные времени, с:

$$T_f = \frac{L_f}{r_f} = \frac{x_f}{\omega r_f} = \frac{1,898}{314 \cdot 0,001248} = 4,843;$$

$$T_D = \frac{x_D}{\omega r_D} = \frac{1,856}{314 \cdot 0,00365} = 1,619;$$

$$T_f' = \frac{x_f'}{\omega r_f} = \frac{0,28}{314 \cdot 0,001248} = 0,714;$$

$$T_D' = \frac{x_D'}{\omega r_D} = \frac{0,238}{314 \cdot 0,00365} = 0,208;$$

$$T_Q = \frac{x_Q}{\omega r_Q} = \frac{1,908}{314 \cdot 0,001826} = 3,328;$$

$$T_Q'' = \frac{x_Q'}{\omega r_Q} = \frac{0,29}{314 \cdot 0,001826} = 0,506;$$

$$T_a = \frac{2x_d'' x_q''}{r\omega(x_d'' + x_q'')} = \frac{2 \cdot 0,221 \cdot 0,297}{0,001426 \cdot 314 \cdot (0,221 + 0,297)} = 0,566;$$

$$T_{d0}' = T_D + T_f = 1,619 + 4,843 = 6,462;$$

$$T_{d0}'' = \left(1 - \frac{x_{ad}^2}{x_f x_D} \right) \left(\frac{T_f T_D}{T_f + T_D} \right) =$$

$$= \left(1 - \frac{1,776^2}{1,898 \cdot 1,856} \right) \cdot \left(\frac{4,843 \cdot 1,619}{4,843 + 1,619} \right) = 0,127;$$

$$T'_d = \frac{1}{a - \sqrt{a^2 - b}} = \frac{1}{10,768 - \sqrt{10,768^2 - 4,966}} = 0,807;$$

$$T''_d = \frac{1}{a + \sqrt{a^2 - b}} = \frac{1}{10,768 + \sqrt{10,768^2 - 4,966}} = 0,115,$$

где

$$a = \frac{T'_f + T'_D}{2T'_f T'_D \sigma'_{fD}} = \frac{0,714 + 0,208}{2 \cdot 0,714 \cdot 0,208 \cdot 0,625} =$$

$$= 10,768; b = \frac{1}{T'_f T'_D \sigma'_{fD}} = \frac{1}{0,714 \cdot 0,208 \cdot 0,625} = 4,966;$$

$$\sigma'_{fD} = 1 - \frac{(x'_{ad})^2}{x'_f x'_D} = 1 - \frac{0,158^2}{0,28 \cdot 0,238} = 0,625.$$

Во время переходного процесса сопротивления синхронной машины изменяются. Характер изменения определяется по формулам:

$$\frac{1}{x_d(t)} = \frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-t/T''_d} =$$

$$= \frac{1}{1,95} + \left(\frac{1}{0,288} - \frac{1}{1,95} \right) e^{-t/0,807} + \left(\frac{1}{0,221} - \frac{1}{0,288} \right) e^{-t/0,115} =$$

$$= 0,513 + 2,959 e^{-1,239t} + 1,052 e^{-8,695t};$$

$$\frac{1}{x_q(t)} = \frac{1}{x_q} + \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) e^{-t/T''_q} =$$

$$= \frac{1}{1,95} + \left(\frac{1}{0,297} - \frac{1}{1,95} \right) e^{-t/0,506} = 0,513 + 2,854 e^{-1,976t}.$$

Графики изменения сопротивлений синхронного генератора по продольной $x_d(t)$ и поперечной $x_q(t)$ оси приведены на рис. 4.33.

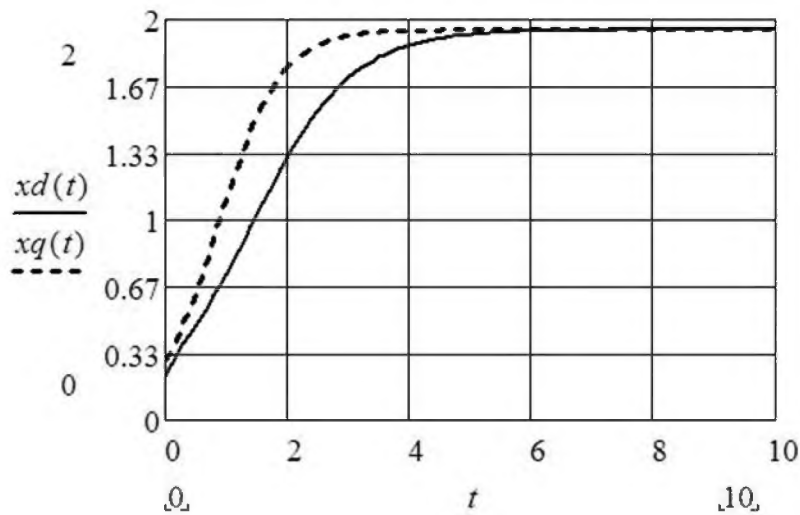


Рис. 4.33. Зависимость изменения сопротивлений СМ $x_d(t)$ и $x_q(t)$

Токи в статорных контурах:

$$\begin{aligned}
 i_{dk}(t) &= i_{d0} - \frac{u_{q0}}{x_d(t)} + \frac{u_0}{x_d''} e^{-t/T_a} \cos(\omega t + \theta_0) = \\
 &= -8,122 - 7,113 \cdot (0,513 + 2,959e^{-1,239t} + 1,052e^{-8,695t}) - \\
 &\quad - \frac{9,093}{0,221} e^{-\frac{t}{0,566}} \cos(314t - 38,53^\circ) = \\
 &= -11,711 + 21,047e^{-1,239t} + 7,483e^{-8,695t} - \\
 &\quad - 41,14e^{-1,767t} \cos(314t - 38,53^\circ); \\
 i_{qk}(t) &= i_{q0} + \frac{u_{d0}}{x_q(t)} - \frac{u_0}{x_q''} e^{-t/T_a} \sin(\omega t + \theta_0) = 2,905 - \\
 &\quad - 5,664 \cdot (0,513 + 2,854e^{-1,976t}) - \\
 &\quad - \frac{9,093}{0,297} e^{-1,767t} \sin(314t - 38,53^\circ) = \\
 &= -16,165e^{-1,976t} + 30,616e^{-1,767t} \sin(314t - 38,53^\circ).
 \end{aligned}$$

В установившемся режиме КЗ $i_{dk}(t = \infty) = -11,771$ кА, $i_{qk}(t = \infty) = 0$ кА.

Начальные значения $i_{dk}(t = 0) = -8,122$ кА, $i_{qk}(t = 0) = 2,905$ кА совпадают со значениями этих токов в предшествующем нормальном режиме (рис. 4.34).

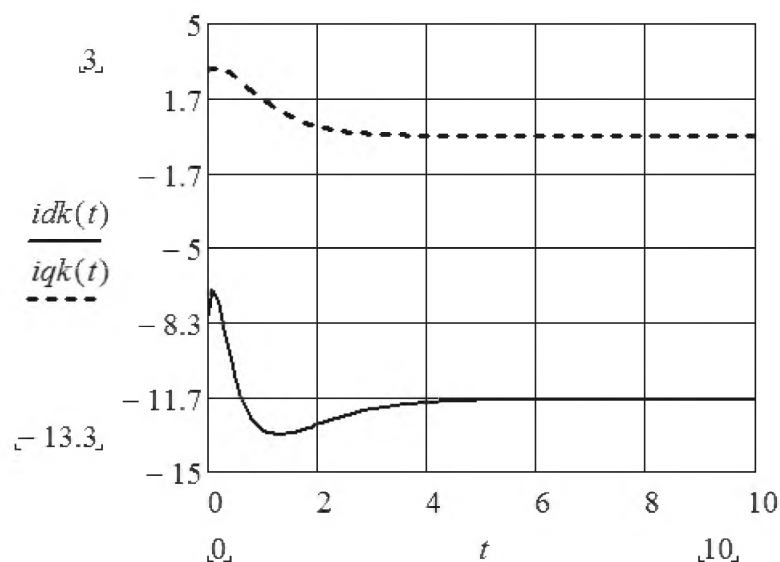


Рис. 4.34. Зависимость изменения
во времени $i_{dk}(t)$ и $i_{qk}(t)$

Изменение расчетных ЭДС (рис. 4.35) в переходном процессе описывается выражениями:

$$e_q(t) = u_{q0} - i_{d0}x_d(t) =$$

$$= 7,113 - \frac{-8,112}{0,513 + 2,959e^{-1,239t} + 1,052e^{-0,695t}};$$

$$e_d(t) = u_{d0} + i_{q0}x_q(t) = -5,664 + 2,905 \cdot \frac{1}{0,513 + 2,854e^{-1,976t}}.$$

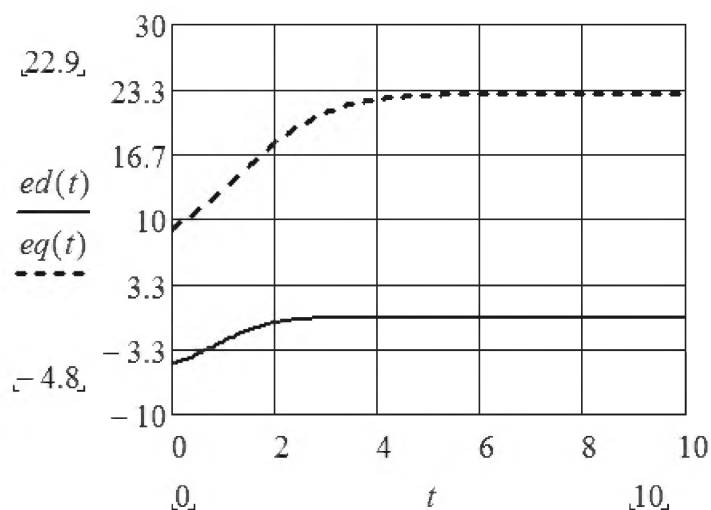


Рис. 4.35. Зависимость изменения
во времени $e_d(t)$ и $e_q(t)$

Начальные значения ЭДС

$$e_q(t=0) = 8,906 \text{ кВ}; e_d(t=0) = -4,801 \text{ кВ}.$$

Установившиеся значения ЭДС

$$e_q(t=\infty) = 22,926 \text{ кВ}; e_d(t=\infty) = 0 \text{ кВ}.$$

Полное значение тока в фазе статора определяется по формуле

$$i_{Ak}(t) = i_{A0}(t) + \Delta i_{A\omega}(t) + \Delta i_{Aa}(t) + \Delta i_{A2\omega}(t),$$

где $i_{A0}(t)$ — периодическая составляющая тока статора основной частоты с постоянной амплитудой и постоянной фазой,

$$\begin{aligned} i_{A0}(t) &= i_{d0} \cos \gamma + i_{q0} \sin \gamma = i_0 \cos(\omega t + \varphi_0) = \\ &= 8,626 \cos(\omega t - 31,79^\circ); \end{aligned}$$

$\Delta i_{A\omega}(t)$ — периодическая составляющая тока статора основной частоты,

$$\begin{aligned} \Delta i_{A\omega}(t) &= \sqrt{\left(\frac{u_{q0}}{x_d(t)}\right)^2 + \left(\frac{u_{d0}}{x_q(t)}\right)^2} \cos(\omega t + \gamma_0 + \varepsilon(t)) = \\ &= \sqrt{(3,649 + 21,047e^{-1,239t} + 7,483e^{-8,695t})^2 + \\ &\quad + (2,905 + 16,165e^{-1,276t})^2} \cos(314t + \gamma_0 + \varepsilon(t)), \\ \varepsilon(t) &= \operatorname{arctg} \frac{u_{d0}}{u_{q0}} \cdot \frac{x_d(t)}{x_q(t)}; \end{aligned}$$

$\Delta i_{Aa}(t)$ — аperiodическая составляющая тока статора,

$$\begin{aligned} \Delta i_{Aa}(t) &= \frac{u_0}{2} \left(\frac{1}{x_d''} + \frac{1}{x_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\gamma_0 + \theta_0) = \\ &= 35,880e^{-1,767t} \cos(\gamma_0 + \theta_0); \end{aligned}$$

$\Delta i_{A2\omega}(t)$ — периодическая составляющая тока статора двойной частоты с затухающей амплитудой и постоянной фазой,

$$\begin{aligned}\Delta i_{A2\omega}(t) &= \frac{u_0}{2} \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(2\omega t + \gamma_0 + \theta_0) = \\ &= 5,264 e^{-1,767t} \cos(2 \cdot 314t + \gamma_0 + \theta_0).\end{aligned}$$

Расчет токов роторных контуров, приведенных к напряжению ступени обмотки статора, выполняется по выражениям:

- ток в обмотке возбуждения

$$i_{fk}(t) = i_{f0} + \Delta i_f' e^{-t/T_d'} + \Delta i_f'' e^{-t/T_d''} + \Delta i_{f\omega} e^{-t/T_a} \cos(\omega t + \theta_0);$$

- ток в продольном демпферном контуре

$$i_{Dk}(t) = \Delta i_D' e^{-t/T_d'} + \Delta i_D'' e^{-t/T_d''} + \Delta i_D e^{-t/T_a} \cos(\omega t + \theta_0);$$

- ток в поперечном демпферном контуре

$$i_{Qk}(t) = \Delta i_Q'' e^{-t/T_Q'} + \Delta i_Q e^{-t/T_a} \sin(\omega t + \theta_0).$$

Вопросы для самопроверки

1. Какие основные допущения принимаются при расчете переходного процесса для трехфазного КЗ на выводах статорной обмотке синхронного генератора?
2. Что означает фраза: «При расчете переходного процесса для трехфазного КЗ считается, что у генератора отсутствуют все нелинейные эффекты»?
3. Почему синхронный генератор (СГ), как правило, представляется разными сопротивлениями и разными схемами замещения по осям d и q ?
4. Что представляет преобразование Blondеля?
5. Дайте характеристику токов трехфазного КЗ в статорных и роторных контурах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основной

1. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С. А. Ульянов. М. : Энергия, 1970. 415 с.
2. Электротехнический справочник. В 3 т. Т. 3. Кн. 1: Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.]. М. : Энергоиздат, 1982. 656 с.
3. Расчеты токов КЗ для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ : руководящие указания по релейной защите / ВГПИИиНИИ Энергосетьпроект. М. : Энергия, 1979. Вып. 2. 152 с.
4. Крючков И. П. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И. П. Крючков [и др.] ; под. ред. И. П. Крючкова и В. А. Старшинова. М. : Академия, 2005. 416 с.
5. Руководящие указания по расчету токов КЗ и выбору электрооборудования : РД 153-34.0-20.527–98. М. : НЦ ЭНАС, 2001. 151 с.
6. Рудницкий М. П. Основы аналитической теории электромагнитных переходных процессов в синхронной машине (симметричные режимы) : учеб. пособие по курсу «Переходные процессы в электрических системах» / М. П. Рудницкий. Свердловск : УПИ, 1977. 90 с.

Рекомендуемый

Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников. М. : Высшая школа, 1985. 536 с.

Леутский А. Ю. Исследование переходных процессов в электроэнергетических системах : метод. указания / А. Ю. Леутский, Т. Ю. Паниковская, Г. И. Тейхриб. Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2005. 64 с.

Методические указания по устойчивости энергосистем [Электрон. ресурс] : Приказ Минэнерго России от 30.06.2003 № 277. Режим доступа : http://www.infosait.ru/почта_doc/41/41858/index.htm

Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации : СО 153-34.20.501-2003 : утв. Минэнерго РФ 19.06.2003. № 229. М. : Минэнерго, 2003. 173 с.

Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. 52 с.

Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учеб. пособие / Т. Я. Окуловская, Т. Ю. Паниковская, В. А. Смирнов. Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2007. 84 с.

Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях / под ред. В. А. Веникова. М. : Энергоатомиздат, 1983. 504 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Вопросы для самопроверки.....	8
1. Симметричное КЗ в электрической системе	9
1.1. Трехфазное КЗ в простейшей электрической цепи	9
1.2. Основные допущения расчетов токов КЗ в сетях напряжением выше и ниже 1 кВ	15
1.3. Математические модели электрической системы и ее элементов. Преобразование схемы замещения.....	18
Вопросы для самопроверки.....	27
1.4. Трехфазное КЗ в разветвленных сетях	28
1.5. Порядок расчета тока КЗ в аварийной ветви	31
Вопросы для самопроверки.....	36
1.6. Расчет периодической составляющей тока трехфазного КЗ от синхронных и асинхронных машин в произвольный момент времени.....	37
1.7. Учет изменения параметров электрической цепи при расчете токов КЗ.....	43
Вопросы для самопроверки.....	48
Расчетные примеры к главе 1.....	48
2. Принципы анализа переходных процессов при однократном нарушении симметрии	77
2.1. Применение метода симметричных составляющих при анализе режимов с однократной несимметрией	78
2.2. Анализ граничных условий в месте несимметрии при однофазном коротком замыкании $K(1)$	80
2.3. Параметры и схемы замещения элементов электрических систем для обратной и нулевой последовательности	83
2.4. Составление схем замещения различных последовательностей	95
2.5. Практические методы расчета режимов электрических систем с однократной несимметрией.....	97
2.6. Сравнение различных видов несимметричных коротких замыканий	102
2.7. Однократная продольная несимметрия	104
Вопросы для самопроверки.....	107
Расчетные примеры к главе 2.....	107

3. Особенности расчета коротких замыканий в распределительных сетях напряжением 3–35 кВ и в сетях напряжением до 1 кВ	131
3.1. Особенности расчета токов КЗ в распределительных сетях напряжением 3–35 кВ	131
3.2. Простое замыкание на землю	131
3.3. Особенности расчета токов КЗ в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ	136
Расчетные примеры к главе 3.....	145
Вопросы для самопроверки.....	154
4. Анализ переходного процесса при трехфазном коротком замыкании на выводах статорной обмотки синхронного генератора.....	154
4.1. Физическая модель синхронной машины	155
4.2. Модель синхронной машины в осях d , q , 0	164
4.3. Параметры синхронной машины.....	175
4.4. Установившийся режим работы синхронной машины	179
4.5. Начальный момент переходного процесса в СМ. Внезапное изменение режима.....	188
4.6. Симметричное КЗ на зажимах статора синхронной машины	194
Расчетный пример к главе 4	201
Вопросы для самопроверки.....	211
Библиографический список.....	212

Учебное издание

**Котова Елена Николаевна,
Паниковская Татьяна Юрьевна**

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Редактор *И. В. Меркурьева*
Компьютерная верстка *Т. С. Кринициной*
Компьютерный набор *Е. Н. Котовой*

Подписано в печать 25.08.2014. Формат 60×90 1/16.
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 13,5.
Уч.-изд. л. 10,7. Тираж 200 экз. Заказ № 1503.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8(343)375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8(343)350-56-64, 350-90-13
Факс: 8(343)358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru

